



ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE IMPACTO DE DEBRIS FLOWS

Carlos Andrés Grau Sacoto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro

Junho de 2017

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE IMPACTO DE DEBRIS FLOWS

Carlos Andrés Grau Sacoto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. ^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.

Prof. Rogério Luiz Feijó, D.Sc.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão, Ph.D.

Prof. Willy de Alvarenga Lacerda, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2017

Grau Sacoto, Carlos Andrés

Análise dos Esforços de Impacto de Debris Flows /
Carlos Andrés Grau Sacoto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2017.

XXI, 165 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 146-156.

1. Esforços de impacto. 2.Estruturas de proteção. 3.
Modelagem numérica. I. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Aos meus pais pelo constante apoio,
amor e carinho ao longo da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e as inumeráveis benções recebidas ao longo da minha vida.

A minha querida Madre Dolorosa pela proteção durante este tempo do mestrado.

A minha família, pelo constante apoio e suporte, que mesmo estando longe me apoiaram durante todo este tempo.

À professora Anna Laura, pelo suporte oferecido ao longo do desenvolvimento deste trabalho, assim como pela dedicação e confiança. Pela amizade e guia durante todo o mestrado.

Aos membros da banca pela avaliação do trabalho, professores Willy Alvarenga Lacerda, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão e Rogério Luiz Feijó.

Aos professores da COPPE com os quais tive a oportunidade de aprender no decorrer do curso de mestrado.

A todos amigos e colegas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ pela convivência e apoio durante esses mais de dois anos de mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE IMPACTO DE DEBRIS FLOWS

Carlos Andrés Grau Sacoto

Junho/2017

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

Os fluxos de detritos ou *debris flows* são os movimentos de massa mais catastróficos e difíceis de serem previstos. O emprego de estruturas de proteção e de convivência, na maioria das áreas susceptíveis à ocorrência de fluxos de detritos, é a intervenção mais adequada para a segurança das pessoas e infraestruturas. O dimensionamento das estruturas exige o conhecimento de parâmetros básicos de fluxos de detritos. Pesquisas do grupo DEBRIS FLOW da COPPE-UFRJ/PUC-RIO têm investigado esse fenômeno no Brasil, obtendo resultados representativos de retroanálises, correlações consistentes com os volumes finais, área de deposição e distância percorrida. Porém, parâmetros como velocidade, altura do fluxo, energia e força de impacto são muito difíceis de medir e obter. O objetivo deste trabalho é aprofundar o estudo destes parâmetros de forma a se obter mais subsídios para o dimensionamento de barreiras de impacto. Foram realizadas simulações nos programas numéricos DANW e Rocfall usando a reologia de atrito. Os resultados das simulações tais como velocidade do fluxo, altura do fluxo, volume final, área de deposição, distância percorrida, energia do movimento foram comparados com os resultados de pesquisas anteriores de fluxos de detritos ocorrido no Morro Duas Pedras em janeiro de 2011. As análises realizadas permitiram contribuir com recomendações para a estimativa dos esforços de impacto para projeto das estruturas de proteção contra fluxos de detritos no Brasil.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEBRIS FLOWS IMPACT PRESSURE ANALYSIS

Carlos Andrés Grau Sacoto

June/2017

Advisor: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

Debris flows are the most difficult landslide to be predicted and they can cause catastrophic lost. The use of protection structures, in most of the areas that are susceptible to the occurrence of debris flows, is the most appropriate intervention for the safety of human lives and infrastructures. Projects of protection structures require knowledge of basic parameters of debris flows. The COPPE-UFRJ / PUC-RIO DEBRIS FLOW group has developed researches of this phenomenon in Brazil, obtaining representative results of retro-analyzes, consistent correlations with final volumes, potential impact areas and runout distance. However, parameters such as velocity, flow height, energy and impact force are very difficult to measure and obtain. The objective of this research is to study deeply these parameters in order to obtain more knowledge for the design of impact barriers. Simulations were performed in numerical programs such as DANW and Rocfall, using friction rheology parameters. Simulation results such as flow velocity, flow height, final volume, potential impact area, runout distance, and energy were compared with the results of previous researches of debris flows at Morro Duas Pedras in January 2011. The results achieve recommendations to estimate impact efforts to design the protection structures against debris flows in Brazil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. RELEVÂNCIA	1
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	2
CAPÍTULO 2	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. MOVIMENTOS DE MASSA	4
2.2. FLUXOS DE DETRITOS	9
2.2.1. Características	11
2.2.2 . Mecanismos deflagradores	14
2.2.3. Principais Parâmetros	16
2.2.4. Medidas de mitigação e convivência	25
CAPÍTULO 3	30
MODELOS DE FORÇAS DE IMPACTO.....	30
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS	31
3.2.1. Modelos Hidráulicos	31
3.2.2. Modelos Empíricos	49
3.2.3. Modelos de Impacto de corpos sólidos	51
3.2.4. Modelos de Ondas de colisão	52
3.3. IMPACTO DE BLOCOS	53
3.4. DIFERENTES CENÁRIOS.....	55
3.4. CONSIDERAÇÕES DO USO DOS MODELOS DE FORÇA DE IMPACTO .	58
3.6. ALTERNATIVA DE ABORDAGEM AO MÉTODO DA FORÇA (MÉTODO DA ENERGIA).....	61
CAPÍTULO 4	64
MÉTODOS NUMÉRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS	64
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	64
4.2. PROGRAMAS DISPONÍVEIS NO MERCADO	65
4.3. CARACTERÍSTICAS DO DAN3D E DAN-W.....	67
4.4. EQUAÇÕES GOVERNANTES DO DAN-W E DAN3D	68

4.4.1. Reologia dos materiais	70
4.4.2. Dados de entrada dos programas.....	73
4.5. CARACTERÍSTICAS DO ROCFALL	74
4.5.1. Diferentes tipos de movimentos	74
4.5.2. Dados de entrada e de saída do Rocfall.....	75
CAPÍTULO 5	76
CASOS DE ESTUDO	76
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	76
5.2. FLUXOS DE DETRITOS MORRO DUAS PEDRAS	76
5.2.1. Agente Deflagrador	76
5.2.2. Localização.....	77
5.2.3. Geologia	79
5.2.4. Características dos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras	80
5.3. RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS FLUXOS DE DETRITOS MORRO DUAS PEDRAS	85
5.4. FLUXOS DE DETRITOS INSTRUMENTADOS EM ENSAIOS DE CAMPO	88
5.4.1. Fluxos de detritos em Pieve di Alpago – Itália	88
5.4.2. Fluxos de detritos em Veltheim – Suíça.....	91
CAPÍTULO 6	94
ANÁLISES.....	94
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	94
6.2. ANÁLISES DE MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA.....	96
6.2.1. Análises de modelos de força de impacto de fluxos de detritos.....	96
6.2.2. Análises de energia de impacto de fluxos de detritos	104
6.2.3. Análises de modelos de força de impacto de queda de blocos.....	106
6.2.4. Considerações finais das análises de modelos existentes na literatura	107
6.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAN-W DE TESTES DE CAMPO	108
6.3.1. Dados de entrada para a simulação	109
6.3.2. Dados de saída para a simulação.....	109
6.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAN-W MORRO DUAS PEDRAS.....	112
6.4.1. Dados de entrada para a simulação	113
6.4.2. Dados de saída da simulação.....	116
6.5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA ROCFALL DO MORRO DUAS PEDRAS	120
6.5.1. Dados de entrada para a simulação	120

6.4.2. Dados de saída para a simulação	122
6.6. COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES RESULTADOS	123
6.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
CAPÍTULO 7	142
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	142
7.1. CONCLUSÕES	142
7.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
APENDICE I.....	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipo de movimentos de massa.	7
Figura 2.2. Zonas da trajetória de fluxo de detritos (NUNES & SAYÃO, 2014).	12
Figura 2.3. Declividade típica das zonas da trajetória de fluxo de detritos canalizado (VANDINE, 1996).	12
Figura 2.4. Formas de deposição de fluxo de detritos: livre e canalizado (Adapt. NETTLETON et al., 2005).	14
Figura 2.5. Mecanismo de ação de fluxos de detritos desencadeado por impactos (SASSA, 1985).	15
Figura 2.6. Esquema para: (a) arrastre nas margens e erosão na base. (b) seção transversal do canal erodido (Mod. MCDOUGALL, 2006 e MCDOUGALL & HUNGR, 2005). .	24
Figura 2.7. Métodos de mitigação de fluxo de detritos (NUNES & RIOS FILHO, 2009).	26
Figura 2.8. Medidas ativas para fluxos de detritos: (a) Túnel de desvio, França (HUEBL & FIEBIGER, 2005); (b) Check dams, Espanha (COROMINAS, 2013); (c) Debris racks, Colorado, USA (DE WOLFE et al., 2008); (d) Barreiras tubulares, Japão (MISUYAMA, 2008); (e) e (f) Barragem, BC, Canadá (WIECZOREK et al., 1997); (g) Barreira flexível, Japão (VOLKWEIN et al., 2011); (h) Túneis falsos (COROMINAS, 2013).	29
Figura 3.1. Modelos de forças de impacto de fluxos de detritos.	31
Figura 3.2. Possíveis esquemas do mecanismo de impacto de fluxo de detritos contra uma parede vertical: (a) Formação de uma onda completamente refletida e (b) Formação de uma protuberância vertical (ARMANINI et al., 2011).	33
Figura 3.3. Esquema da evolução da onda de impacto com o tempo (A a F) e a variação da força de impacto (CANELLI et al., 2012).	37
Figura 3.4. Relação entre força de impacto de fluxos de detritos e Número de Froude considerando dados obtidos em campo e laboratório (HUBL et al., 2009).	39
Figura 3.5. Diferentes padrões de carregamento para impactos de fluxos de detritos (HUBL et al., 2009).	41
Figura 3.6. Processos de impacto de fluxo de detritos medidos com sensores (CUI et al., 2015).	42
Figura 3.7. Padrões simplificados de carregamento de impacto de fluxos de detritos em estruturas (CUI et al., 2015).	42

Figura 3.8. Relação entre o coeficiente empírico α e o Número de Froude (CUI et al., 2015).....	44
Figura 3.9. Padrão de carregamento do fluxo de detritos viscoso (HE et al., 2016).	45
Figura 3.10. Padrão de carregamento do fluxo de detritos diluído (HE et al., 2016).....	45
Figura 3.11. Esquema do modelo de VAGNON & SEGALINI (2016).....	49
Figura 3.12. Cenários de dimensionamento – Múltiplos impactos dos detritos (KWAN, 2012).....	57
Figura 3.13. Cenários de dimensionamento – Impacto de queda de bloco e galgamento da barreira (KWAN, 2012).....	58
Figura 4.1. Diagrama da abordagem do fluxo equivalente (Mod. HUNGR, 1995).	67
Figura 4.2. Método numérico Lagrangeano baseado em SPH (HUNGR, 1995).	69
Figura 4.3. Interpretação do SPH em um marco de profundidade média (Mod. MCDOUGALL, 2006).	69
Figura 4.4. Relação entre os parâmetros utilizados no modelo de atrito (MC DOUGALL, 2006).....	72
Figura 5.1. Zona de Convergência do Atlântico Sul. Situação Climática no evento de 2011 (BAGGIO & HORN, 2011).....	77
Figura 5.2. Imagem de Satélite da área antes do evento no Morro Duas Pedras, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2016).....	78
Figura 5.3. Imagem de Satélite da área depois do evento no Morro Duas Pedras, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2016).....	78
Figura 5.4. Fraturas subverticais do maciço destacadas na ortofoto (GEOMECANICA, 2011).....	80
Figura 5.5. Origem do fluxo de detritos Hospital São Lucas na cota 1300m. (GEOMECANICA, 2011).	81
Figura 5.6. Zonas de iniciação, transporte e deposição do fluxo de detritos Hospital São Lucas.....	81
Figura 5.7. Blocos de rocha de grandes proporções na zona de deposição.	82
Figura 5.8. Trajetória do fluxo de detritos Córrego D`Antas originada na cota 1300m (GEOMECANICA, 2011).	83
Figura 5.9. Movimento de massa do Córrego D´Antas (PELIZONI, 2014).	84
Figura 5.10. Fluxos de detritos de Córrego D´Antas divididos em duas zonas para a realização das modelagens (VALVERDE, 2016).	87
Figura 5.11. Seção transversal do fluxo de detritos Hospital São Lucas.....	87

Figura 5.12. Seção transversal crítica do fluxo de detritos Córrego D’Antas.	88
Figura 5.13. Área de ensaios de fluxos de detritos de Pieve di Alpago (Disponibilizada por MACCAFERRI).....	89
Figura 5.14. Ensaios de fluxo de detritos em Pieve di Alpago (Disponibilizada por MACCAFERRI).....	90
Figura 5.15. Esquema da barreira flexível instrumentada com células de carga (SEGALINI et al., 2016).	91
Figura 5.16. Vista geral da área de testes de Veltheim (WENDELER, 2010).	93
Figura 5.17. Canal do ensaio de campo com os pontos de localização da barreira e instrumentação (BUGNION et al., 2011).	93
Figura 6.1. Fluxograma das análises e comparações realizadas na pesquisa	95
Figura 6.2. Classificação dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos sem e com Número de Froude.	97
Figura 6.3. Perfil topográfico do fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 1.	114
Figura 6.4. Perfil topográfico do fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.	115
Figura 6.5. Perfil topográfico do fluxo de detritos Hospital São Lucas.	116
Figura 6.6. Variação da velocidade obtida com Rocfall em função da distância percorrida para os fluxos de detritos do Morro Duas Pedras.	122
Figura 6.7. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico - Córrego D’Antas Zona 1.	127
Figura 6.8. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico - Córrego D’Antas Zona 2.	127
Figura 6.9. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico – Hospital São Lucas.	128
Figura 6.10. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D’Antas Zona 1.	135
Figura 6.11. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D’Antas Zona 2.	136
Figura 6.12. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Hospital São Lucas.	137
Figura 6.13. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Córrego D’Antas – Zona 1.	139

Figura 6.14. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Córrego D'Antas – Zona 2.	140
Figura 6.15. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Hospital São Lucas.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação ampliada dos tipos de movimento (VARNES, 1978).	6
Tabela 2.2. Classificação segundo a velocidade do movimento (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, AGS, 2002).	8
Tabela 2.3. Correlações empíricas para estimativa do volume (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).	17
Tabela 2.4. Relações empíricas para estimativa da velocidade (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).	18
Tabela 2.5. Correlações empíricas para a estimativa da vazão de pico (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).	20
Tabela 2.6. Correlações empíricas para estimativa da distância total percorrida (Mod. NUNES & SAYÃO, 2014).	21
Tabela 2.7. Correlações empíricas para estimativa da área da seção transversal (NUNES & SAYÃO, 2014).	22
Tabela 2.8. Correlações empíricas para estimativa da área planimétrica (NUNES & SAYÃO, 2014).	22
Tabela 2.9. Medidas ativas para mitigação de fluxo de detritos (NUNES & RIOS FILHO, 2009).	28
Tabela 3.1. Estimativas do fator empírico k para diferentes modelos (HUBL et al., 2009).	40
Tabela 3.2. Valores de forças de impacto derivados de fluxos de detritos estudados na Rússia (WU et al., 1993).	50
Tabela 3.3. Características dos modelos de esferas moles e leis de forças (STEVENS & HRENYA, 2005).	52
Tabela 3.4. Modelos de força de impacto de blocos.	53
Tabela 3.5. Resumo dos diferentes modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos.	60
Tabela 3.6. Propostas de estimativa da pressão dinâmica de detritos (Adap. KWAN, 2012).	61
Tabela 4.1. Principais programas numéricos para análises de fluxos de detritos (Adapt. Luna, 2012).	66

Tabela 5.1. Dados e Resultados obtidos das simulações do Fluxo de Detritos Córrego Dantas.	85
Tabela 5.2. Forças registradas pelas células de carga da barreira flexível.	91
Tabela 5.3. Velocidades e pressões registradas pelas células de carga da barreira flexível.	92
Tabela 6.1. Valores dos fatores empíricos de impacto adotados para os modelos hidrostáticos (Grupo 1) e hidrodinâmicos (Grupo 2).	98
Tabela 6.2. Velocidade e altura dos fluxos de detritos em função da trajetória percorrida.	98
Tabela 6.3. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 2 - Córrego D'Antas Zonas 1 e 2.....	99
Tabela 6.4. Valores de pressão de impacto obtidas com modelos do Grupo 1 e Grupo 2 - Hospital São Lucas.	99
Tabela 6.5. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 3 - Córrego D'Antas - Zonas 1 e 2.	100
Tabela 6.6. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 3 - Hospital São Lucas.	100
Tabela 6.7. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 2 e Grupo 3 - Córrego D'Antas - Zonas 1 e 2.	101
Tabela 6.8. Valores de pressão de impacto obtidos com os modelos do Grupo 2 e Grupo 3 - Hospital São Lucas.....	101
Tabela 6.9. Relação do Número de Froude e tipo de fluxo com a distância percorrida pelos fluxos de detritos.	102
Tabela 6.10. Valores de massa de impacto dos fluxos de detritos obtidos com a abordagem modificada (M1) e tradicional (M2).....	105
Tabela 6.11. Forças de impacto de queda de blocos segundo modelo de MIZUYAMA (1979) dos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras.	107
Tabela 6.12. Comparação de resultados numéricos do DAN-W e reais dos ensaios de Pieve di Alpago.	110
Tabela 6.13. Comparação de resultados numéricos do DAN-W e reais dos ensaios de Veltheim.	112
Tabela 6.14. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1.	113

Tabela 6.15. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.	114
Tabela 6.16. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Hospital São Lucas.	115
Tabela 6.17. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 1.....	116
Tabela 6.18. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 1.	117
Tabela 6.19. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.....	118
Tabela 6.20. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.	118
Tabela 6.21. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Hospital São Lucas.	119
Tabela 6.22. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Hospital São Lucas.	120
Tabela 6.23. Materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall.	121
Tabela 6.24. Valores de velocidade máxima e energia cinética obtidas com RocFall para os fluxos de detritos.....	123
Tabela 6.25. Velocidades dos fluxos de detritos de VALVERDE (2016).	124
Tabela 6.26. Velocidades dos fluxos de detritos desta pesquisa.	125
Tabela 6.27. Diferenças percentuais entre os valores de velocidade obtidos das diferentes simulações.	126
Tabela 6.28. Valores de altura máxima dos fluxos de detritos de VALVERDE (2016).	130
Tabela 6.29. Valores de altura máxima dos fluxos de detritos desta pesquisa.....	130
Tabela 6.30. Diferenças percentuais da altura do fluxo do Morro Duas Pedras.	131
Tabela 6.31. Tipo de fluxo relacionado com o número de Froude.....	132
Tabela 6.32. Número de Froude e tipo de fluxo das simulações de VALVERDE (2016).	132
Tabela 6.33. Número de Froude e tipo de fluxo das simulações dos fluxos de detritos do morro Duas Pedras desta pesquisa.....	133

Tabela 6.34. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 1.	135
Tabela 6.35. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 2.	136
Tabela 6.36. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Hospital São Lucas.	137
Tabela 6.37. Diferenças percentuais entre pressão de impacto obtidas das abordagens de queda de bloco e fluxo de detritos.	139

LISTA DE SÍMBOLOS

V	-	volume final
Q_p	-	vazão de pico
V_{SED}	-	volume de sedimentos
L	-	distância percorrida
A_C	-	área de contribuição
H	-	diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final
v	-	velocidade
g	-	aceleração da gravidade
r	-	raio de curvatura do canal
θ	-	gradiente de superelevação
α	-	inclinação do canal (fahrböschung)
V_{max}	-	velocidade máxima
Δh	-	altura de superelevação
y	-	altura média do fluxo
S	-	inclinação do canal
γ	-	peso específico do material
K	-	fator de forma do canal
μ	-	viscosidade dinâmica do fluxo
h	-	espessura do fluxo
V_M	-	volume de água
S_d	-	declividade de deposição
Er	-	taxa de erosão
V_f	-	volume final
V_i	-	volume inicial
\bar{S}	-	distância percorrida
$P_{m\acute{a}x}$	-	pressão máxima de impacto do fluxo de detritos
k	-	fator empírico ou fator de impacto
ρ_{Mu}	-	densidade do fluxo de detritos
h_{Mu}	-	altura do fluxo de detritos
h_0	-	altura do fluxo de detritos não perturbada
v	-	velocidade do fluxo de detritos
α	-	fator empírico ou fator de impacto
A	-	área da seção transversal do fluxo
β	-	Ângulo entre a face da barreira e a direção do fluxo

F^-	-	força de impacto adimensional
ψ	-	parâmetro de ajuste e usualmente
Fr	-	número de Froude
P_f	-	força de impacto da lama
ρ_f	-	densidade da lama no fluxo de detritos
v_f	-	velocidade da lama do fluxo de detritos
P_g	-	força de impacto dos pedregulhos
ρ_s	-	densidade dos pedregulhos no fluxo de detritos
E	-	módulo de elasticidade
v_s	-	velocidade dos pedregulhos
Φ	-	volume de fração sólida do fluxo de detritos
Q	-	descarga de água/sedimento
$ V $	-	velocidade média
h	-	altura da estrutura
ϕ'	-	ângulo de atrito do fluxo
hd	-	altura do fluxo de detritos que ultrapassa a barreira
k	-	coeficiente de empuxo de terra
F_{stat}	-	força ativa do solo
F_{dyn}	-	força dinâmica
F_{drag}	-	força de arraste
K_a	-	condição ativa de rankine
H_{max}	-	altura máxima do fluxo de detritos contra a barreira
h_f	-	profundidade do fluxo de detritos
P_w	-	densidade da água
D_{max}	-	partícula de maior diâmetro do fluxo
U	-	velocidade do bloco
K	-	fator de rigidez da estrutura
M	-	massa do bloco
J	-	momento de inércia
G	-	peso do bloco submerso no fluxo de detritos
L	-	comprimento da estrutura
E	-	energia de impacto
Q	-	vazão de pico
T	-	duração de impacto do fluxo de detritos
V_{DF}	-	volume do fluxo de detritos
a	-	aceleração
T	-	tempo

k	-	pressão interna
σ	-	tensão normal
E	-	arraste gerado pelo movimento
τ	-	tensão cisalhante
φ	-	ângulo de atrito dinâmico
φ_b	-	ângulo de atrito basal
r_u	-	coeficiente de poropressão
f	-	coeficiente de atrito
ξ	-	parâmetro de turbulência

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA

Os movimentos de massa são eventos naturais ou induzidos que, muitas vezes, acarretam importantes perdas econômicas e alto risco para a vida humana. Esses fenômenos naturais podem ser produzidos por forças gravitacionais, movimentos sísmicos e altos índices de precipitação.

De todos os tipos de movimentos, os fluxos de detritos são os mais destrutivos e catastróficos, envolvendo grandes volumes de mistura de água, solo, detritos e blocos rochosos, e podendo atingir elevadas velocidades e grandes áreas de deposição.

Os fluxos de detritos são muito complexos e de difícil previsão, geralmente ocorrem em locais com uma topografia íngreme, e deflagrado por elevadas precipitações em curtos períodos de tempo ou precipitações baixas de longa duração.

Os casos mais relevantes de fluxos de detritos até 2010 no Brasil eram os da região serrana de Cubatão em São Paulo e Serra das Araras no Rio de Janeiro. Em janeiro de 2011, devido às intensas precipitações, ocorreu a tragédia na Região Serrana do Rio de Janeiro, com vários movimentos de massas que resultaram em danos catastróficos.

Os principais desafios no estudo dos fluxos de detritos incluem estimar as zonas de risco, prever a probabilidade de ocorrência de um evento e determinar os parâmetros para projetar estruturas de proteção. Simulações numéricas têm sido empregadas para tentar reproduzir os fluxos de detritos e obter parâmetros básicos. Entretanto, a literatura mostra poucos resultados em função da determinação de esforços de impacto, essenciais para o projeto das barreiras de proteção.

Desta forma, esta pesquisa procura contribuir para ampliar o conhecimento de fluxos de detritos e os esforços de impacto envolvidos para um melhor dimensionamento de estruturas de proteção.

1.2.OBJETIVO DO TRABALHO

Esta dissertação tem como principal objetivo o estudo dos esforços de impacto de fluxos de detritos, utilizando métodos existentes na literatura e análises numéricas com os programas DAN-W e Rocfall, aplicadas aos casos históricos dos fluxos de detritos do Morro Das Pedras, na Região Serrana do Rio de Janeiro, ocorridos em janeiro de 2011. Para alcançar a finalidade principal desta pesquisa, vários objetivos específicos foram visados:

- (i) Compilação e análises dos diferentes modelos de força de impacto;
- (ii) Validação do programa DAN-W com os resultados obtidos da instrumentação de testes de campo;
- (iii) Análise e comparação das simulações realizadas com DAN-W e DAN3D considerando diferentes reologias, especialmente a de atrito e de Voellmy;
- (iv) Análise e comparação das simulações realizadas com o programa Rocfall com a abordagem tradicional da energia;
- (v) Recomendações para o dimensionamento de estruturas de impacto para fluxos de detritos.

1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação é composta por sete capítulos, sendo este primeiro um capítulo de introdução com os objetivos da pesquisa e a organização do documento.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de diversos conceitos de movimentos de massas, salientando os fluxos de detritos com as características principais e seus agentes deflagradores. O capítulo também apresenta os principais parâmetros que caracterizam os fluxos de detritos tais como volume, velocidade, descarga pico, distância percorrida, área de deposição e taxa de erosão. Este capítulo finaliza ressaltando as principais medidas de mitigação e convivência dos fluxos de detritos.

O Capítulo 3 descreve os diferentes modelos de força de impacto existente na literatura com suas classificações, ressaltando-se os modelos hidráulicos. Também são considerados os modelos de impacto de blocos e os diferentes cenários de impacto que podem acontecer durante um fluxo de detritos. Considerações do uso dos modelos de

força de impacto são também apresentadas. A abordagem do método da energia cinética tradicional é tratada ao final do capítulo.

No Capítulo 4 são apresentados os conceitos para a modelagem numérica de fluxos de detritos, incluindo uma lista dos programas disponíveis no mercado. Os programas usados nesta pesquisa são apresentados com suas características e dados de entrada e de saída.

O Capítulo 5 apresenta os casos de estudo de fluxos de detritos ocorridos no Morro Das Pedras. Os fluxos de detritos estudados são o de Córrego D'Antas e Hospital São Lucas, salientando as características de cada um deles e os resultados das análises anteriores realizadas por outros autores. Apresenta também duas campanhas de ensaios in situ de fluxos de detritos realizadas em campo experimental na Itália e Suíça.

O Capítulo 6 dedica-se à apresentação dos resultados das diferentes análises. Diferentes simulações numéricas foram feitas usando diferentes reologias e programas. Os resultados das diferentes análises são comparados entre si e com modelos hidráulicos e hidrostáticos propostos na literatura.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sintetiza as contribuições deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

O documento conta com um Apêndice que compila os resultados de todas as análises desenvolvidas com os modelos hidráulicos e hidrostáticos avaliados nessa pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do tema da pesquisa desenvolvida nesta dissertação. São abordados os principais tipos de movimentos de massa, dando ênfase aos fluxos de detritos. São descritos os mecanismos de mobilização, as etapas de progressão do movimento e as relações empíricas para determinação de parâmetros de fluxos de detritos, além de ferramentas numéricas para simulação do movimento existentes na literatura nacional e internacional.

2.1. MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são deslocamentos de materiais de diversas granulometria numa encosta natural ou em um talude de corte, que podem ser induzidos pelo homem ou por fenômenos naturais e que, geralmente são relacionados à ação da gravidade.

Segundo GIANI (1992), pode-se entender como movimento de massa qualquer deslocamento de solo e/ou rocha que implica um aumento da tensão cisalhante atuante ou a redução da resistência ao cisalhamento da massa de solo, rocha ou mistura, podendo ser provocados por fatores naturais ou não.

Esses movimentos são objeto de diversos estudos nas regiões montanhosas e serranas no mundo, pois muitas vezes representam um perigo para as comunidades ao redor, e podem ocasionar perdas humanas e econômicas.

Dentre os principais fatores naturais que contribuem para a geração de movimentos de massas nas encostas destacam-se a geometria e geomorfologia do local, duração e intensidade de precipitações, geologia da região, cobertura vegetal, tipo de ocupação do solo, sismos ou outras situações incomuns, tais como rompimento de barragens (NUNES & RIOS FILHO, 2009). Estes fatores somados às forças gravitacionais definem o tipo de movimento originado e as consequências ocasionadas.

Em muitas ocasiões, os movimentos de massas são originados pelo homem, principalmente, quando ocupam áreas inadequadas, muitas vezes susceptíveis às rupturas de encostas e outras vezes por obstrução de canais e leitos de rios.

CRUDEN (1991) enfatiza que não é correto traduzir *landslide* de modo literal como “escorregamento de terra”. Do mesmo modo, MOTTA (2014) reporta a confusão frequente entre movimento de massa (*landslide*) e escorregamento (*slide*). Os escorregamentos somente representam uma parte dos movimentos de massa, mas não abrangem todos.

Segundo CRUDEN (2003), o trabalho de DANA (1876) é um dos primeiros a apresentar uma simples, porém incompleta, classificação de movimentos de massa, pois só apresenta três tipos destes.

As dificuldades de nomenclatura são evidenciadas nas diferentes classificações de diversos autores. GUIDICINI & NIEBLE (1983) destacam os seguintes autores que propuseram classificações de movimentos de massa: BALTZER (1875), HEIM (1882), PENCK (1894), MOLITOR (1894), BRAUN (1908), HOWE (1909), ALMAGIÀ (1910), STINI (1910), TERZAGHI (1925), POLLACK (1925), LADD (1935), HENNES (1936), SHARPE (1938), TERZAGHI (1950), VARNES (1958), PENTA (1960), FREIRE (1965), TERSTEPANIAN (1966), VARGAS (1966), COSTA NUNES (1969), SKEMPTON & HUTCHINSON (1969) e ZÁRUBA & MENCL (1969).

ORTIGÃO & SAYÃO (2004) descrevem que a classificação dos movimentos de massa obedece aos seguintes critérios:

- i. Cinética do movimento: definida pela relação entre a massa em movimentação e o terreno estável (velocidade, direção e sequência dos deslocamentos);
- ii. Tipo do material: solo, rocha, detritos, depósitos, destacando a sua estrutura, textura e conteúdo de água;
- iii. Geometria: tamanho e forma das massas mobilizadas;
- iv. Modalidade de deformação do movimento.

A classificação ampliada de VARNES (1978) é a mais utilizada internacionalmente. VARNES (1958) propôs uma primeira classificação que era muito clara em suas definições, mas pouco detalhada e que foi modificada em 1978. Essa classificação depende da superfície de ruptura da massa em movimento e do tipo de materiais que a compõe, conforme apresentado na Tabela 2.1 e ilustrado na Figura 2.1

Tabela 2.1. Classificação ampliada dos tipos de movimento (VARNES, 1978).

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solo	
				Granular	Fino
Queda			rocha	detritos	terra
Tombamento			rocha	detritos	terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas Unidades	abatimento de rocha	abatimento de detritos	abatimento de terra
	Translacional		blocos rochosos	blocos de detritos	blocos de terra
			Muitas Unidades	rocha	detritos
	Expansão Lateral			rocha	detritos
Fluxo			rocha	detritos	terra
			rastejo profundo	rastejo de solo	
Complexos			combinação de dois ou mais movimentos / materiais		

AUGUSTO-FILHO (1992) ajustou a classificação dos movimentos em encostas de VARNES (1978) segundo os movimentos de massa ocorrentes no Brasil. Além disso, apresenta os fundamentos dos diferentes tipos de movimento em função dos planos de ruptura, materiais e velocidades associadas ao movimento. CRUDES & VARNES (1996) fizeram uma proposta de alteração da classificação anterior.

A Tabela 2.2 apresenta uma proposta de classificação baseada na velocidade do movimento (AGS, 2002). Observa-se que, para movimentos de massa extremamente rápidos e muito rápidos, não existem medidas preventivas e/ou protetivas a serem tomadas, pois sua alta velocidade não permite uma evacuação de pessoas. Importante notar que a grande maioria dos fluxos de detritos se encaixam nessa classificação.

Segundo NUNES & SAYÃO (2014), os fluxos de detritos são os movimentos de massa mais catastróficos e difíceis de se prever. Estudos indicam que 104 mil mortes foram provocadas no período de 2002 a 2012 por grandes movimentos de massa, em sua maioria fluxo de detritos.

Os fluxos de detritos ocorrem tipicamente em regiões de relevo escarpado e atingidas por chuvas ocasionais (JAKOB & HUNGR, 2005) e se caracterizam pelo transporte de sedimentos e materiais grosseiros desde as encostas até os rios.

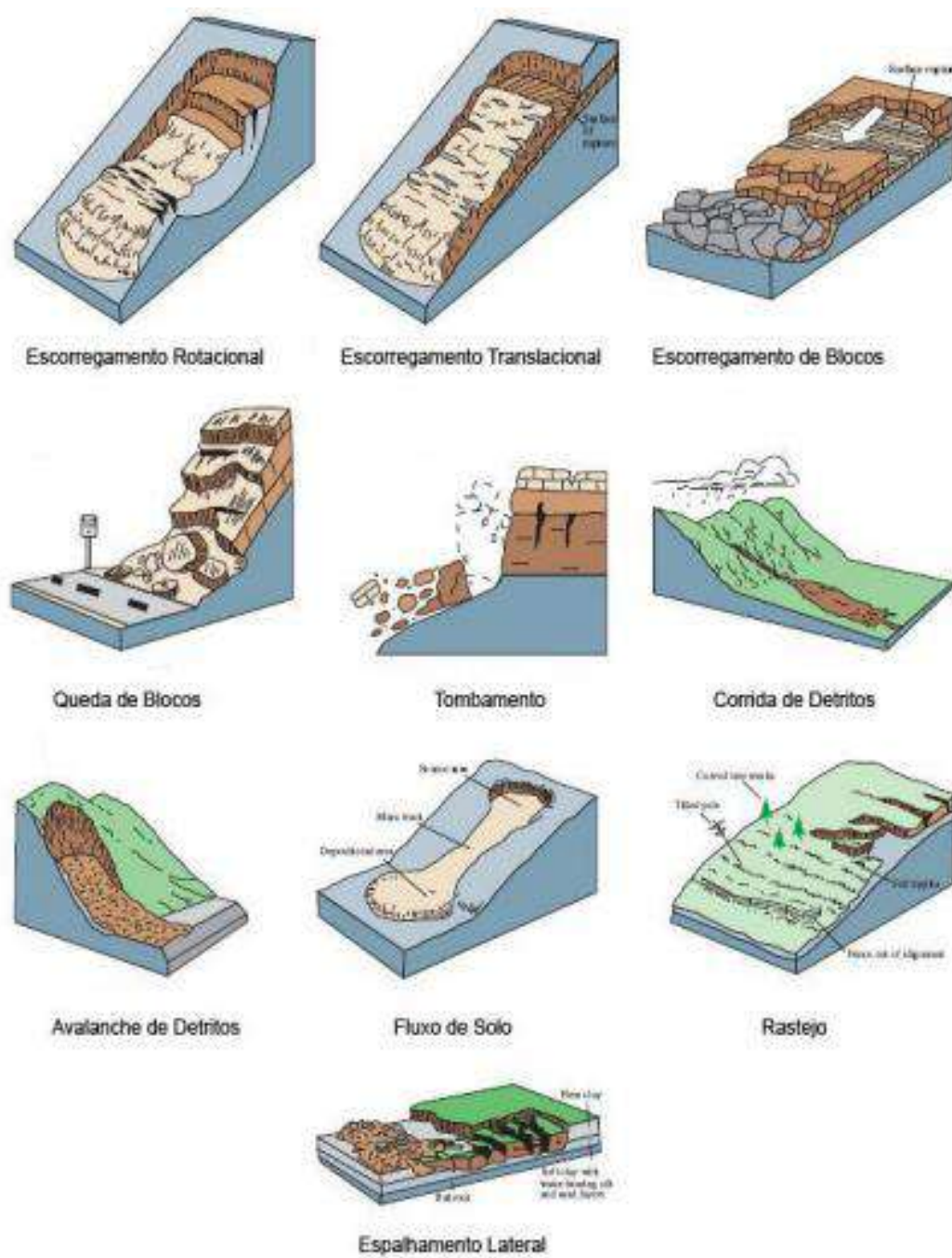


Figura 2.1. Tipo de movimentos de massa.

Tabela 2.2. Classificação segundo a velocidade do movimento (*AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, AGS, 2002*).

Classe	Descrição	Velocidade Típica	Danos esperados e a reação da população
1	Extremamente Rápido	> 5 m/s	Desastres catastróficos; edificações destruídas por impacto de material deslocado, muitas perdas de vida. Sobrevivência improvável.
2	Muito Rápido	> 3m/min	Algumas perdas de vida; velocidades altas não permitem que as pessoas deixem o local.
3	Rápido	> 1,8 m/h	Possível evacuação, edificações destruídas.
4	Moderado	> 13 m/mês	Algumas edificações provisórias conseguem resistir ao movimento.
5	Lento	> 1,6 m/ano	Reparações em edificações podem ser feitas durante o movimento, estruturas insensíveis ao movimento podem ser mantidas após trabalho de manutenção se o movimento como um todo não for tão extenso durante uma determinada fase de aceleração.
6	Muito Lento	> 15 mm/ano	A maioria das edificações não sofreram danos.
7	Extremamente Lento	< 15 mm/ano	Imperceptível sem instrumentação para monitoramento; baixo risco de ruínas das construções.

O principal foco desta dissertação são os movimentos do tipo fluxo de detritos, que normalmente ocorrem com velocidades elevadas. HUNGER et al. (2001) propõem as seguintes definições para os materiais de fluxo:

- i) Terra: material coluvionar argiloso (plástico) derivado de argilas ou rochas meteorizadas, com consistência mais próxima do limite plástico que do limite líquido;
- ii) Lama: material mole e solos de argila remodelada com matriz de Índice de Plasticidade superior a 5% e Limite de Liquidez maior que 0,5. BATES & JACKSON (1984) definem lama como um material argiloso líquido ou semi-líquido;

- iii) Detrito: material solto de baixa plasticidade, sendo uma mistura de areia, cascalho, pedras, pedregulho e uma proporção variável de silte e um pouco de argila, às vezes com material orgânico.

Tomando como referência as definições dos materiais anteriores, HUNGR et al. (2001) definem os tipos de fluxos ou corridas por:

- i) Corrida de detritos: fluxo através de um canal íngreme que apresenta velocidades rápidas a extremadamente rápidas e composto por detritos não plásticos saturados. Em areias e partículas finas, o índice de plasticidade é menor que 5%;
- ii) Corrida de lama: fluido em um canal que apresenta velocidades rápidas e extremadamente rápidas, composto por detritos plásticos saturados envolvendo grande quantidade de água com índice de plasticidade maior que 5%;
- iii) Inundação de detritos: fluxo em um canal íngreme que apresenta velocidades muito rápidas com uma crescente quantidade de água com detritos;
- iv) Avalanche de detritos: fluxo em uma encosta íngreme, sem a presença de um confinamento estabelecido por um canal, que apresenta velocidades extremadamente rápidas, composta geralmente por detritos, parcialmente ou totalmente saturado.

2.2. FLUXOS DE DETRITOS

Os fluxos de detritos são movimentos de massa que deslocam grandes massas, que podem incluir materiais como solo, rocha, árvores, lama e que ocorrem com elevadas velocidades, resultando em alto poder de destruição, e em muitos casos, perdas humanas e econômicas consideráveis.

Segundo XAVIER SILVA (2015), as características e os mecanismos de fluxo de detritos permaneceram mal compreendidos por muito tempo, e devido a isto surgiram diversas nomenclaturas que refletem as várias origens, composições e aparências de fluxos de detritos.

Esses movimentos de massa dependem muito da topografia, condições climáticas, geomorfologia, geologia e de outras características intrínsecas das regiões. Por este

motivo existem diversas definições para este movimento. Um exemplo disto ocorre na região semiárida do Peru, onde os antigos incas chamavam o fluxo de detritos de *huaico* que significa mistura de partículas de todos os tamanhos incluindo blocos, ou também de *llapana*, que significa fluxos de lama e areia (SUTTON, 1933).

TAKAHASHI (2006) define esse movimento de massa como uma mistura de água e sedimentos aleatórios, que se comportam como um fluido contínuo que alcança grandes extensões. Para os japoneses, os fluxos de detritos eram considerados como desastres fantasmas, sendo chamados por *Já-nuke* (caminho da serpente), *Yama-tsunami* (tsunami na montanha) e *Yama-shio* (onda da montanha).

Os primeiros fluxos de detritos registrados na história são descritos por MONTANDO (1933) e EISBACHER & CLAGUE (1984). Eles ocorreram nos Alpes Europeus na época dos romanos. Por outro lado, BURGER (1984) afirma que há 3000 anos ocorreram fluxos de detritos no Peru no período inca.

Eventos de fluxos de detritos no século dezessete no Japão são comentados por MATSUSHITA (1999). Na América do Norte, os registros históricos são mais recentes, em número reduzido e em poucos lugares. O Brasil conta com registros de eventos de múltiplos fluxos de detritos que foram deflagrados em 1966 e 1967 no litoral sudeste, Serra das Araras e Caraguatatuba.

SKERMER & VANDINE (2005) acreditam que existem muito mais fluxos de detritos do que aqueles registrados na história. Isto é justificado devido ao pouco conhecimento do fenômeno e às epidemias que mataram milhões de pessoas, eliminando assim a possibilidade de testemunhos históricos. Muito possivelmente fluxos de detritos também não foram registrados nas épocas das grandes guerras.

STINY (1910) foi uns dos primeiros a definir os fluxos de detritos como um tipo específico de movimento de massa. Ele se refere a um fluido percorrendo uma montanha e que vai transportando sólidos e sedimentos em suspensão. À medida que aumentam os sedimentos carregados, o fluxo também aumenta até um determinado limite, quando se transforma em uma massa viscosa contendo uma mistura de água, solo, areia, pedregulho, rochas e madeira, parecendo uma lava de vulcão percorrendo um talvegue.

Nos Estados Unidos existe uma definição proposta por SHARPE (1938), similar à definida por STINY (1910), na qual os *debris flows* correspondem à fluxos rápidos

saturados de detritos indiferenciados em um canal íngreme. HUTCHINSON (1988) também reconhece os fluxos de detritos e os divide entre canalizados e não canalizados na encosta. Porém, alguns autores preferem definir este tipo de fluxo como fluxo de lama (BLACKWELDER, 1928; BULL, 1964; CRANDELL, 1957).

A maioria de fluxos de detritos carregam material orgânico produto das erosões no talvegue. Para aqueles fluxos que contêm mais de 60% do volume em detritos orgânicos, SWANSTON (1974) chamou de torrente de detritos, e esse termo é ainda usado na zona oeste dos Estados Unidos e Canadá.

2.2.1. Características

Os materiais que formam os fluxos de detritos podem mostrar uma grande variação, resultando em diversas classificações e definições. JAKON (2010) propõe uma definição combinada com a de HUNGR et al. (2005) e a de IVERSON (2009). Estes autores definem o fluxo de detrito como um fluxo de minerais não plásticos saturados e detritos orgânicos em um canal íngreme, que incluem cerca de 50-70% de grãos sólidos em volume, e que podem atingir velocidades de fluxo de 10 m/s e variar entre 10 e 109 m³ em volume.

NUNES & SAYÃO (2014) definem que esses movimentos de massa variam de blocos de rocha, galhos e troncos de árvores, cascalho, areia, solo até lama, com concentração de sólidos entre 30 a 70%, conduzidos por gravidade e que alcançam grande mobilidade.

Os fluxos de detritos geralmente apresentam três zonas bem definidas durante sua trajetória. Essas zonas são: zona de iniciação, de transporte e de deposição, ilustradas na Figura 2.2.

Segundo VANDINE (1996), cada zona corresponde a diferentes declividades. A zona de iniciação corresponde a declividades superiores a 25°, a zona de transporte apresenta declividades maiores que 15° e a zona de deposição tem declividades menores que 15° (Figura 2.3).

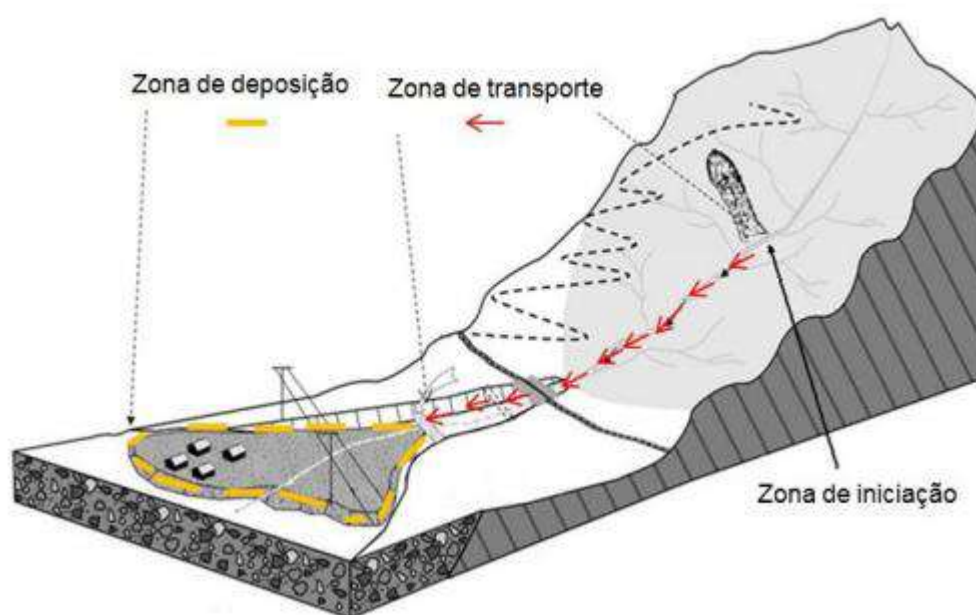


Figura 2.2. Zonas da trajetória de fluxo de detritos (NUNES & SAYÃO, 2014).

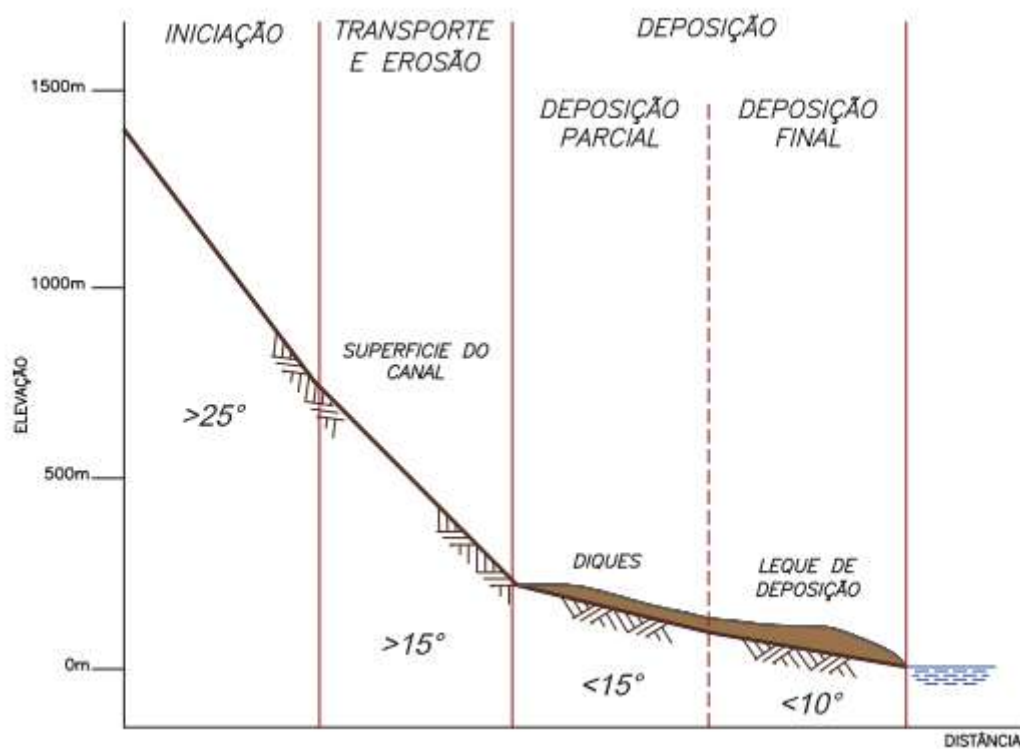


Figura 2.3. Declividade típica das zonas da trajetória de fluxo de detritos canalizado (VANDINE, 1996).

A zona de iniciação é onde se origina o movimento, e isto pode ser causado por uma ruptura localizada na parte alta da encosta, na lateral de um talude ou no canal principal (HUNGR, 2005). A mobilização requer água na massa, o suficiente para saturá-la e converter a energia potencial gravitacional em energia cinética, devido à mudança de deslocamento para fluxo (IVERSON, 1997).

A área de iniciação geralmente possui declividade elevada e segundo TAKAHASHI (1991), o fluxo de detritos pode ser iniciado de três maneiras:

- i. Deslizamento de solo adquire maior mobilidade e se transforma em fluxo de detritos;
- ii. Colapso de uma estrutura ou barreira de solo e sedimento;
- iii. Instabilização das margens do canal a partir da ocorrência ou aumento do escoamento superficial.

Na zona de transporte se produz a maior erosão do material do movimento e, por conseguinte, o volume do fluxo de detritos se incrementa. HUNGR (2005) afirma que o grau de erosão depende das características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo. A erosão e o arraste do material durante a trajetória é uma característica importante dos fluxos de detritos (HUNGR & MCDUGALL, 2009).

Na zona de deposição, a velocidade do movimento se torna menor pela diminuição da declividade da encosta, e pela perda do confinamento e se deposita em forma de leque. Segundo IVERSON (1997), a deposição ocorre quando toda a energia cinética se transforma em outra forma de energia.

VALVERDE (2016) ressalta que existem diversas propostas de declividades típicas para cada zona da trajetória de fluxo de detritos, porém deve se destacar que estes valores são característicos e dependentes de cada evento em função do tipo de material, geologia e geomorfologia do local.

Quanto à forma de deposição, NETTLETON (2005) divide os fluxos de detritos em deposição livre e deposição canalizada, conforme apresentado na Figura 2.4, baseados na topografia e geologia local.

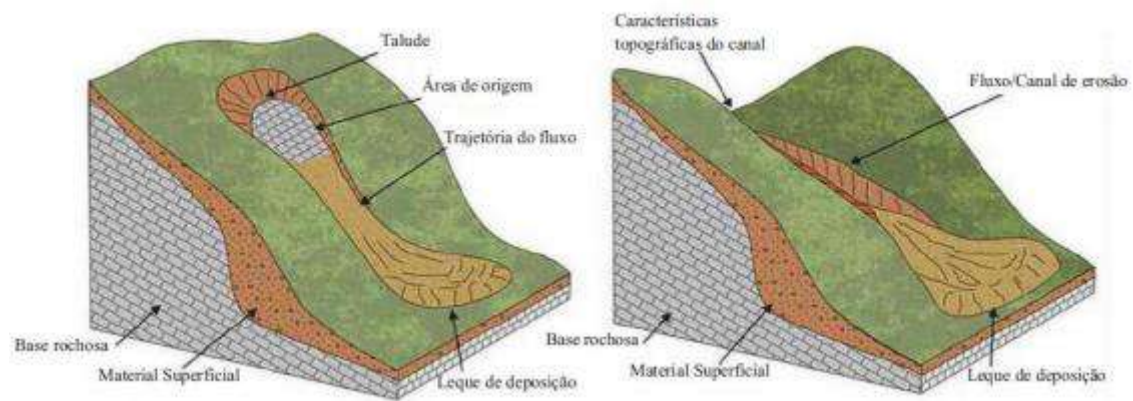


Figura 2.4. Formas de deposição de fluxo de detritos: livre e canalizado (Adapt. NETTLETON et al., 2005).

Os fluxos de detritos não canalizados ou abertos formam seu próprio caminho pelas encostas, como faixas ou camadas, antes de depositar o material em áreas mais baixas, ou com gradientes mais baixos, ou onde as taxas de fluxo são reduzidas (NETTLETON et al., 2005).

Os fluxos de detritos canalizados seguem as características do talvegue existente. HUTCHINSON (1988) afirma que eles possuem consistência semelhante à de um concreto úmido com densidade elevada e alto teor de sólidos, podendo chegar a 80%.

2.2.2 Mecanismos deflagradores

São vários fatores que originam os fluxos de detritos, dentre os quais se destacam os condicionantes e os deflagradores. Os fatores condicionantes são aqueles que conseguem reduzir a resistência do terreno, deixando-o suscetível ao movimento e os fatores deflagradores são aqueles que, por si só, iniciam o movimento (MOTTA, 2014).

O mecanismo deflagrador mais estudado é a intensa precipitação de longa duração sobre superfícies de rupturas existentes, o que produz uma elevação na poropressão e diminuição da resistência ao cisalhamento, resultando na transformação do solo em um fluido viscoso (COSTA, 1984). SASSA e WANG (2005) reportam que em condições climáticas normais, sem ou com pouca chuva, não ocorre uma ruptura por carregamento não drenado e, conseqüentemente, não acontecerá um fluxo de detritos.

Diversos autores estabelecem três mecanismos essenciais para iniciação dos fluxos de detritos (SASSA, 1985 e 1989; ECKERSLEY, 1990; BOVIS & DAGG, 1992; TAKAHASHI, 2000; IVERSON et al., 2000):

- i. Erosão fluvial em canais de drenagem: Atua sob vazões críticas instabilizadoras, causada pelo efeito cisalhante da água corrente no depósito abaixo do canal, advindo de chuvas intensas, derretimento de neve ou rompimento de barragens;
- ii. Aumento da poropressão pela infiltração: Ocorre pelo súbito acréscimo de poropressão nas zonas saturadas, devido a chuvas intensas;
- iii. Aumento da poropressão causado por carregamento muito rápido: Origina-se pelo impacto causado a partir de movimentos de massa ocorridos a montante sobre depósitos em fundos de vale (Figura 2.5).

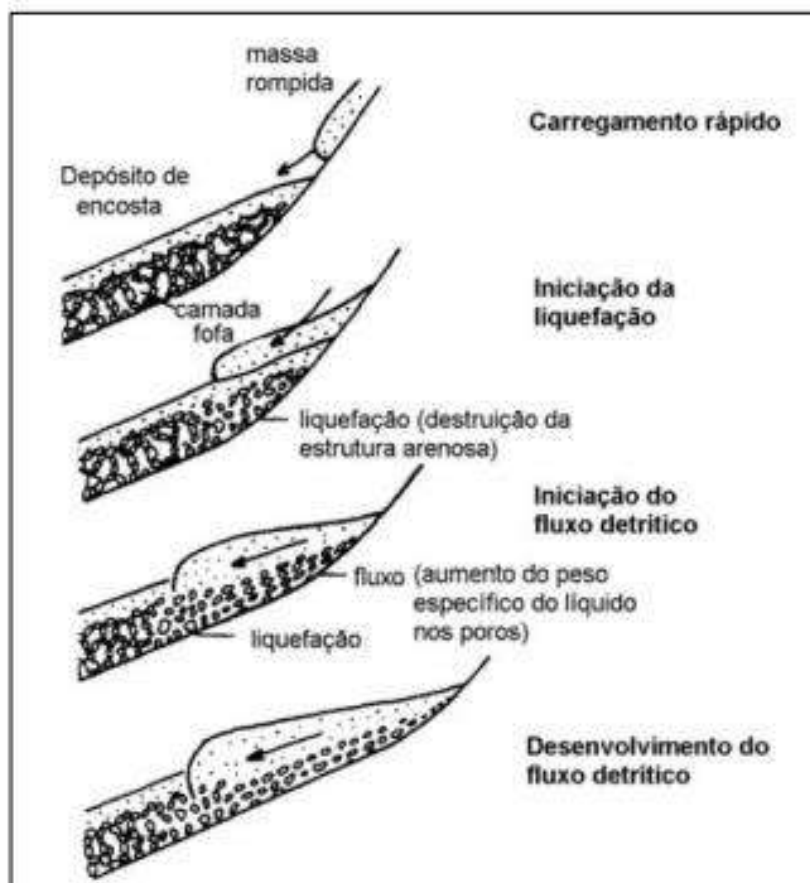


Figura 2.5. Mecanismo de ação de fluxos de detritos desencadeado por impactos (SASSA, 1985).

Em muitos casos os fluxos de detritos são formados pela mobilização de outro movimento de massa. SASSA (1985) mostra que quando a massa rompida atinge um depósito de material solto instável, produz-se uma liquefação tal como apresentado na Figura 2.5.

Entre outros fatores deflagradores de fluxos de detritos estão a ocupação desordenada das encostas, rompimento de barragens, ações sísmicas e vulcânicas. PELIZONI (2014) propõe que devem ser realizadas inspeções periódicas de campo em áreas suscetíveis para evitar que esses fatores sejam ativados.

2.2.3. Principais Parâmetros

Existem diversos parâmetros que caracterizam os fluxos de detritos, os quais são importantes para a sua classificação e descrição. Entre esses parâmetros destacam-se volume, velocidade, descarga ou vazão de pico, distância percorrida, área de deposição e taxa de erosão.

Diversas pesquisas em diferentes países têm sido desenvolvidas para estimar os parâmetros, destacando-se os métodos empíricos e numéricos. Os métodos empíricos se baseiam na análise estatística de dados obtidos dos fluxos de detritos já ocorridos e/ou de ensaios em laboratório e campo, além das simulações numéricas.

Volume

O volume de um fluxo de detritos é definido pelo material transportado até a área de deposição durante um evento. Segundo JAKOB (2005), esses volumes podem ser estimados por meio de mapas dos depósitos.

Recentemente a técnica de fotogrametria tem sido utilizada para a obtenção de parâmetros a partir de fotos aéreas (NUNES & SAYÃO, 2014). A Tabela 2.3 apresenta as diferentes relações empíricas para estimar o volume total de um fluxo de detritos.

Tabela 2.3. Correlações empíricas para estimativa do volume (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Equação	Região
Takahashi (1991)	$V = (665 \cdot Q_p)^{0,85}$	Japão
Mizuhara (1994)	$V_{SED} = 6 \cdot V^{0,761}$	Japão
Mizuhara (1994)	$V_{SED} = 24,3 \cdot V^{0,541}$	China
Corominas (1996)	$V = \left(\frac{L}{H \cdot 1,03} \right)^{0,105}$	Espanha
Rieckenmann (1999)	$V = \left(\frac{L}{1,19 \cdot H^{0,83}} \right)^{1/0,16}$	Mundial
Gramani (2001)	$V = \left(\frac{1,87 \cdot L}{H} \right)^{1/0,105}$	Brazil
Marchi e D'Agostino (2004)	$V = 70\,000 \cdot A_c$	Alpes italianos (Volume máximo)
Marchi e D'Agostino (2004)	$V = 1\,000 \cdot A_c^{0,3}$	Alpes italianos (Volume mínimo)
Polanco (2010)	$V = 252,84 \cdot \left(\frac{L}{H} \right)^{4,72}$	Mundial
Motta (2014)	$V = \left(\frac{L}{2,72} \right)^{1/0,37} \cdot \frac{1}{H}$	Mundial

Ac: área de contribuição; V_{SED}: volume de sedimentos; L: distância total percorrida (m); Q_p: vazão de pico (m³/s); H: altura ou diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final de deposição (m).

Velocidade

A velocidade é um parâmetro muito difícil de se estimar ou medir, pois varia durante o evento. Geralmente a velocidade é determinada por meio de correlações empíricas e ensaios em laboratório. Além disso, SUWA et al. (1993) salientam que a velocidade máxima do fluxo não coincide necessariamente com a parte onde a profundidade da calha é máxima.

Segundo JAKOB (2005), a velocidade pode ser diretamente estimada usando-se a superelevação, calculada a partir do impacto causado em estruturas, ou através de características do canal. A Tabela 2.4 resume diversas relações empíricas para a estimativa da velocidade de fluxo de detritos.

Tabela 2.4. Relações empíricas para estimativa da velocidade (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Equação	Observações
Chow (1959)	$v = (g \cdot r \cdot \cos \theta \cdot \tan \alpha)^{0,5}$ $v = (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{0,5}$	Expressão com inclinação do canal constante, estreito
Sibnuy (1966)	$v = 5,15 \cdot y^{0,67} \cdot S^{0,25}$	-
Kherkheulidze (1975)	$v = 5,8 \cdot y^{0,55} \cdot S^{0,33}$	-
Wigmosta (1983)	$v = (1,21 \cdot g \cdot \Delta h)^{0,5}$	Expressão semi empírica baseada em ensaios de flume e teoria de fluxo laminar viscoso
Zhang et al. (1985)	$v = 21 \cdot H^{0,48} \cdot S^{0,5}$	-
Hungr et al. (1985)	$v = \left(\frac{\gamma \cdot S}{K \cdot \mu} \right) \cdot h^2$	Expressão baseada no modelo de fluxo newtoniano
Rickenmann (1999)	$v = 2,1 \cdot Q^{0,33} \cdot S^{0,33}$	Expressão baseada em fluxo de água turbulento em leitos pedregulhos e casos históricos
Motta (2014)	$v_{MAX} = 120,99 \cdot V^{-0,20}$	Fluxo de detritos, mundiais, 56 eventos, $R^2=0,78$, limite superior
Motta (2014)	$v_{MAX} = 0,15 \cdot V^{-0,25}$	Fluxo de detritos, mundiais, 56 eventos, $R^2=0,97$, limite inferior

r: raio de curvatura do canal (m); α : inclinação do canal (graus); θ : gradiente de superelevação (graus); Δh : altura da superelevação (m); S: inclinação do canal (graus); γ : peso específico do material (kN/m^3); h: espessura do fluxo (m); K: fator de forma do canal; V: volume de fluxo de detritos (m^3); g: gravidade (m^2/s); y: altura média do fluxo (m); μ : viscosidade dinâmica da corrida.

Vazão de pico

A determinação da vazão de pico do fluxo de detritos é importante para avaliar a capacidade de condução do canal do escorregamento, principalmente quando o fluxo de detritos alcança seções críticas tais como vãos de pontes e barreiras de proteção (POLANCO, 2010).

HUNGR (2000) ressalta a importância da descarga de pico e a define como a característica mais importante de um fluxo de detritos, sendo a causa principal do surgimento de grandes ondas de arraste de material.

A estimativa da vazão de pico é importante porque permite analisar a velocidade máxima, profundidade, energia, distância percorrida e forças de impacto do fluxo de detritos, além de informar sobre a capacidade dos canais e das barreiras de impacto do movimento. A Tabela 2.5 apresenta diversas relações empíricas para estimativa da vazão de pico.

Distância total percorrida

BHUWANI (2004) reporta que a distância percorrida é um indicador do processo de transformação de uma massa deslizada em um fluxo de detritos. Se a distância de viagem em um movimento de massa for muito pequena (menor que a distância inicial L do movimento), ele não será transformado. Se a distância é maior, a massa deslizada se comporta como um fluxo de detritos.

A distância total percorrida é a soma dos comprimentos das três zonas dos fluxos de detritos. Pode ser determinado por meio de fotogrametria, medições em campo e a partir de coordenadas obtidas. Porém, existem correlações empíricas para a estimativa da distância final percorrida, apresentadas na Tabela 2.6.

Área de deposição

A área de deposição auxilia na determinação das áreas que podem ser afetadas pelos fluxos de detritos e contribui para elaborar mapas de riscos da região susceptível (SHIEDL & RICKENMAN, 2010). Na Tabela 2.7 e Tabela 2.8 encontram-se diversas relações empíricas propostas na literatura para estimar as áreas de deposição.

Tabela 2.5. Correlações empíricas para a estimativa da vazão de pico (mod. NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Relação	Observações
Costa (1988)	$Q_p = 0,293 \cdot V_M^{0,56}$	Ruptura de barragens
Costa (1988)	$Q_p = 0,016 \cdot V_M^{0,64}$	Degelo
Takahashi (1991)	$V = 665 \cdot Q_p^{0,85}$	Fluxo de detritos, Japão
Misuyama e Kobashi (1992)	$Q_p = 0,0188 \cdot V^{0,790}$	Fluxo de lama
Misuyama e Kobashi (1992)	$Q_p = 0,0135 \cdot V^{0,780}$	Fluxo de detritos
Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0,00558 \cdot V^{0,831}$	Fluxo de detritos vulcânico, Indonésia
Jitousono et al. (1996)	$Q_p = 0,00135 \cdot V^{0,870}$	Fluxo de detritos vulcânico, Japão
Massad et al. (1997)	$V = 500 \cdot Q_p$	Fluxo de detritos, Japão e Canadá
Bovis e Jakob (1999)	$Q_p = 0,04 \cdot V^{0,90}$	Fluxo de detritos granular
Bovis e Jakob (1999)	$Q_p = 0,003 \cdot V^{1,01}$	Fluxo de detritos vulcânicos
Rickenmann (1999)	$Q_p = 0,1 \cdot V^{0,83}$	Fluxo de detritos
Motta (2014)	$Q_p = 0,29 \cdot V^{0,51}$	Fluxo de detritos brasileiros
Motta (2014)	$Q_p = 0,14 \cdot V^{0,59}$	Fluxo de detritos, mundiais, 34 eventos, $R^2=0,71$
V: volume (m³); V _M : volume de água (m³); Q _p : vazão de pico (m³/s).		

Tabela 2.6. Correlações empíricas para estimativa da distância total percorrida (Mod. NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Equação	Observações
Heim (1932)	$L = \frac{H}{\tan \alpha}$	Fluxo de detritos
Rickenmann (1995)	$L = 350 \cdot V^{0,25}$	Valor máximo
Rickenmann (1995)	$L = 3,6 \cdot V^{0,45}$	Valor mínimo
Corominas (1996)	$L = 1,03 \cdot V^{0,105} \cdot H$	Fluxo de detritos, Espanha
Corominas (1996)	$\tan \frac{H}{L} = 0,9256 \cdot 10^{-0,1006 \cdot L \cdot V}$	Fluxo de detritos não canalizados, Espanha
Rickenmann (1999)	$L = 1,9 \cdot V^{0,16} \cdot H^{0,83}$	Fluxo de detritos, Suíça
Garcia-Ruiz et al. (1999)	$L = 7,13 \cdot (V \cdot H)^{0,271}$	Fluxo de detritos, Itália
Crosta et al. (2001)	$L = 7,136 \cdot V^{0,215}$	Fluxo de detritos, Itália
Budetta e Riso (2004)	$L = 1711,5 \cdot \log V - 6094,1$	Fluxo de detritos, Itália
Budetta e Riso (2004)	$\log \frac{H}{L} = -0,18 \cdot \log V - 1,19$	Fluxo de detritos, Itália
Polanco (2010)	$\frac{H}{L} = 3,23 \cdot V^{-0,212}$	Fluxo de detritos, Brasil
Polanco (2010)	$L = 106,61 \cdot V^{0,2591}$	Fluxo de detritos, Brasil
Motta (2014)	$L = \left(\frac{H}{3,55} \right)^{1/0,69}$	Fluxo de detritos, Brasil, R ² =0,76
Motta (2014)	$\frac{H}{L} = -0,83 \cdot \ln V + 11,20$	Limite superior, fluxo de detritos, mundiais, 160 eventos, R ² =0,91
Motta (2014)	$\frac{H}{L} = -0,06 \cdot \ln V - 0,52$	Limite inferior, fluxo de detritos, mundiais, 160 eventos, R ² =0,92
Motta (2014)	$L = 2,29 \cdot V^{0,17} \cdot H^{0,75}$	Fluxo de detritos, mundiais, 136 eventos, R ² =0,71

V: volume (m³); α : *ângulo de fahrböschung*; H: altura ou diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final de deposição.

As áreas de deposição para *lahars*, segundo IVERSON et al. (1998), estão divididas em áreas de seção transversal (A) e áreas planimétricas do depósito (B). BERTI & SIMONI (2007) definem a área de seção transversal como a área do talvegue do fluxo de detritos que é inundada na descarga de pico e varia ao longo do canal, e a área planimétrica do depósito é a área medida por fotos aéreas e com GPS quando fluxo é depositado.

Tabela 2.7. Correlações empíricas para estimativa da área da seção transversal (NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Equação	Observações
Iverson et al. (1998)	$A = 0,05 \cdot V^{2/3}$	Lahars, EUA
Berti e Simoni (2007)	$A = 0,08 \cdot V^{2/3}$ $A = 0,19 \cdot V^{0,57}$	Fluxo de detritos, Alpes, Itália
Griswold e Iverson (2007)	$A = 0,10 \cdot V^{2/3}$ $A = 0,22 \cdot V^{0,59}$	Fluxo de detritos
Motta (2014)	$A = 0,23 \cdot V^{0,57}$	Fluxos de detritos, mundiais, 69 eventos, $R^2=0,87$
V: volume do fluxo de detritos		

Tabela 2.8. Correlações empíricas para estimativa da área planimétrica (NUNES & SAYÃO, 2014).

Referência	Equação	Observação
Iverson et al. (1998)	$B = 200 \cdot V^{2/3}$	Lahars, EUA, $R^2=0,90$
Waytomas et al. (2000)	$B = 91,8 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de lama vulcânica (Alasca), 10 eventos, $R^2=0,90$
Capra et al. (2003)	$B = 55 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos e deslizamento, México, 6 eventos, $R^2=0,79$
Crosta e Dal Negro (2003)	$B = 6,2 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Itália, 91 eventos, $R^2=0,96$

Griswold (2004)	$B = 19,9 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, $R^2=0,91$
Yu et al. (2006)	$B = 28,8 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Tailândia, 6 eventos, $R^2=0,94$
Berti e Simoni (2007)	$B = 17 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Alpes, Itália, 24 eventos
	$B = 6,8 \cdot V^{0,76}$	Fluxo de detritos, Alpes, Norte da Itália, 24 eventos
Griswold e Iverson (2007)	$B = 20 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, $R^2=0,91$
	$B = 10 \cdot V^{0,73}$	Fluxo de detritos, 44 eventos, $R^2=0,92$
Scheidl e Rickernmann (2010)	$B = 17,3 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Alemanha, 44 eventos, $R^2=0,59$
	$B = 28,1 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos granular, Alpes, Suíça, 34 eventos, $R^2=0,70$
	$B = 32 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça, 8 eventos, $R^2=0,42$
	$B = 44,7 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, fluxos de detritos, Alpes, Áustria, 12 eventos, $R^2=0,67$
	$B = 56,1 \cdot V^{2/3}$	Sedimentos fluviais e fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 27 eventos, $R^2=0,85$
	$B = 13,5 \cdot V^{0,79}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça (1987), 12 eventos, $R^2=0,68$
	$B = 323,8 \cdot V^{0,44}$	Fluxo de detritos, Alpes, Suíça (2005), 8 eventos, $R^2=0,58$
	$B = 47,8 \cdot V^{0,68}$	Fluxo de detritos, Alpes, Sul da Alemanha, 27 eventos, $R^2=0,85$
	$B = 57,2 \cdot V^{0,59}$	Fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 34 eventos, $R^2=0,72$
	$B = 7,4 \cdot V^{0,77}$	Fluxo de detritos, Alpes, Áustria, 44 eventos, $R^2=0,60$
Polanco (2010)	$B = 7 \cdot V^{0,66}$	Fluxo de detritos, mundiais
Motta (2014)	$B = 187,67 \cdot V^{2/3}$	Fluxo de detritos, mundiais, 118 eventos, $R^2=0,90$
	$B = 24,37 \cdot V^{0,77}$	Fluxo de detritos, mundiais, 118 eventos, $R^2=0,79$

V: volume do fluxo de detritos

Taxa de erosão

PELIZONI (2014) sugere que o grau de erosão de um determinado canal de fluxo de detritos depende de diversos fatores, principalmente da inclinação do canal e das características geológicas do material na base e nas margens do canal. JAKOB et al. (2014) enfatizam que é muito importante conhecer a profundidade de erosão para projetar e construir estruturas de proteção.

Os materiais que estão nos talwegues, por onde se mobilizam os fluxos de detritos, normalmente se encontram superficiais e com altas umidades, tornando-o um material fácil de deslocar com cargas rápidas. MC DOUGALL & HUNGR (2005) esclarecem que a erosão ocorre no leito do canal, conforme mostrado na Figura 2.6, e o arraste do material se produz normalmente na frente da onda e nas margens do canal e, portanto, existe uma mistura dos dois materiais.

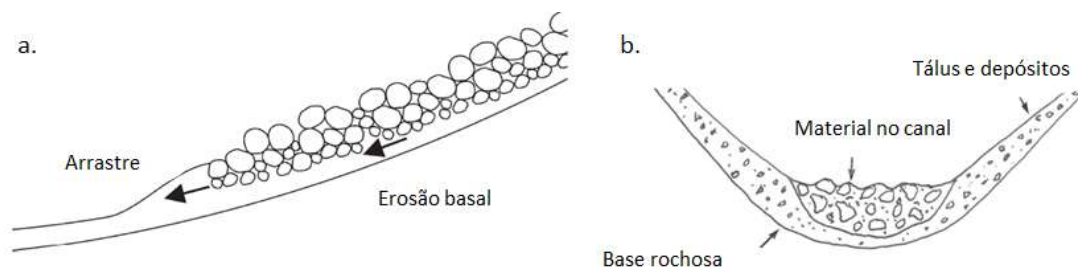


Figura 2.6. Esquema para: (a) arraste nas margens e erosão na base. (b) seção transversal do canal erodido (Mod. MCDOUGALL, 2006 e MCDOUGALL & HUNGR, 2005).

MC DOUGALL & HUNGR (2005) apresentam uma relação que estima a taxa de erosão, cujos resultados são similares aos obtidos por TAKAHASHI (1992), expressa por:

$$Er = \frac{\ln(V_f / V_i)}{\bar{S}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde V_f é o volume final, V_i corresponde ao volume inicial e \bar{S} representa a distância percorrida.

Forças de impacto

As forças de impacto provocadas pelos fluxos de detritos em estruturas de proteção são muito difíceis de se estimar, visto que dependem de vários fatores e variam durante toda a trajetória. Vários pesquisadores têm estudado os diferentes modelos que podem ser divididos em 3 categorias: hidráulicos, empíricos e de colisão sólida. Este tema é tratado em detalhes mais à frente, em função da sua importância para a análise dos modelos de força de impacto.

2.2.4. Medidas de mitigação e convivência

Todos os movimentos de massa representam riscos e podem ocasionar perdas tanto humanas como econômicas, especialmente em áreas urbanas. Porém, os fluxos de detritos são os mais catastróficos devido à alta velocidade com que ocorrem e a ausência de sinais de iniciação.

A falta de sinal de alerta e grande velocidade, geralmente muito maior que a velocidade de corrida de uma pessoa, tornam a reação humana impossível para o enfrentamento do problema. Desta forma, torna-se essencial o desenvolvimento de medidas de proteção e de redução de vulnerabilidades aos fluxos de detritos, as quais podem ser ativas ou passivas.

As medidas ativas são aquelas que interferem diretamente no processo de instabilização, conseguindo eliminar as possibilidades de ruptura e os riscos. Em contraste com essas medidas, as passivas tentam reduzir os riscos e danos de ruptura, sem entretanto evitar as rupturas. Além disso, são medidas combinadas entre técnicas e político-administrativas (NUNES & SAYÃO, 2014). A Figura 2.7 apresenta uma classificação das principais medidas de mitigação.

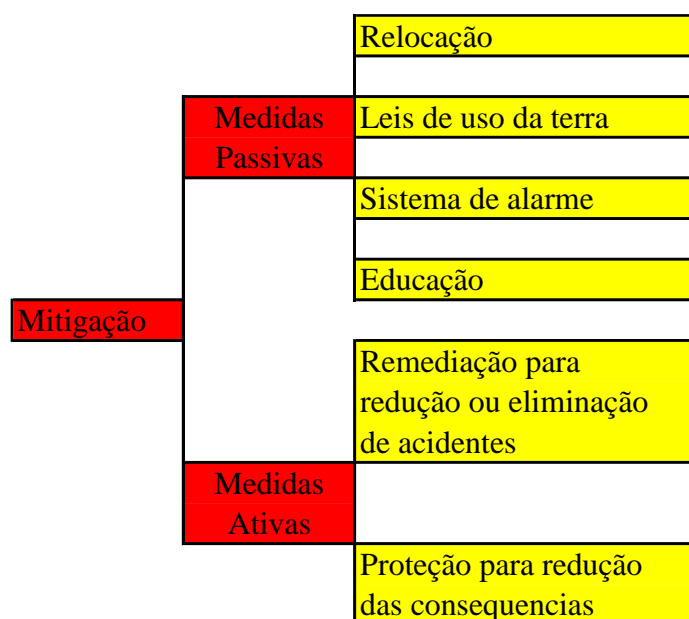


Figura 2.7. Métodos de mitigação de fluxo de detritos (NUNES & RIOS FILHO, 2009).

Medidas passivas

As medidas passivas não incluem nenhum tipo de obra ou qualquer intervenção técnica física e representam principalmente as ações governamentais para a proteção de pessoas e infraestruturas em áreas de riscos de fluxos de detritos. Compreendem o mapeamento de áreas, relocação de infraestruturas e moradores, instalação de sistemas de alerta e educação (NUNES & SAYÃO, 2014).

PELIZONI (2014) afirma que deve existir uma combinação de medidas ativas e passivas contra *debris flows* para garantir uma adequada relação custo-benefício da intervenção a se realizar. Recomenda também a elaboração de mapeamentos para definição de áreas de riscos pelas instituições governamentais, objetivando principalmente a avaliação de soluções tais como a realocação ou a convivência monitorada com sistemas de alerta.

As medidas passivas relativas à instrução e educação da população também são importantes, pois informam e preparam as pessoas que moram em áreas de riscos de movimentos de massa, além de minimizar a ocupação ilegal.

Medidas ativas

As medidas ativas atuam diretamente nos fatores deflagradores e nos processos de transporte e deposição de fluxos de detritos, visando principalmente reduzir o seu escoamento e erosão. Tais medidas podem ser responsáveis pela redução da probabilidade de ocorrência do movimento. Por exemplo, a diminuição do escoamento pode ser obtida por meio da redução da descarga de pico resultante da ação de medidas florestais, gestão de bacias hidrográficas e desvio de escoamento para outras áreas. Por outro lado, pode-se reduzir a erosão com o aumento da estabilidade das encostas, produzido pela diminuição da descarga de água na parte alta do canal (HUEBL & FIEBIGER, 2005). A Tabela 2.9 apresenta a classificação das medidas ativas considerando sua função, proposta por NUNES & RIOS FILHO (2009).

O tipo de estrutura de controle de fluxo de detritos depende das características topográficas, estruturas geológicas, litologia do material envolvido, localização, geomorfologia, aspectos geotécnicos, facilidade de acesso na área, tipo de material que compõe o fluxo e da estrutura local para a realização da obra (MOTTA, 2014; PELIZONI 2014).

VAN DINE (1996) classifica as estruturas de controle de fluxos de detritos em dois tipos: abertas e fechadas. As estruturas abertas confinam e restringem o movimento do fluxo, enquanto que as estruturas fechadas são dimensionadas para conter o material do fluxo. Entre as estruturas abertas estão as áreas de deposição não confinadas, *baffles* (obstáculos de fluxo), *check dams*, bermas laterais, bermas de deflexão e bermas ou barreiras terminais. As estruturas fechadas são representadas por *debris racks*, barragens permeáveis, estruturas vazadas que funcionam como barreiras resistentes aos detritos, e que são projetadas para impedir a passagem dos detritos grosseiros. A Figura 2.8 apresenta as medidas ativas contra fluxos de detritos.

As áreas de deposição não confinadas são aquelas situadas na zona de deposição e que coletam os detritos. São geralmente áreas de depósito extensas, que são acompanhadas de defletores (*baffles*) e bermas terminais. Os defletores são estruturas que impedem e/ou retardam o fluxo e são usualmente complementares a outras medidas (NUNES & SAYÃO, 2014).

Tabela 2.9. Medidas ativas para mitigação de fluxo de detritos (NUNES & RIOS FILHO, 2009).

Função	Medida
Redução de runoff	Reflorestamento
	Controle de descarga
	Desvio de runoff para outras áreas
Redução de erosão	Reflorestamento
	Uso de bioengenharia
	Drenagem
	Estabilização do talude
	Alargamento de canal
	Estabilização de leito de canal
Controle de descarga	Desvio de runoff
	Criação de reservatórios
Controle de detritos	Alargamento de canal
	Bacia de deposição de detritos
	Bermas de deflexão
	Detritus flow breaker
	Túneis para detritos
	Túneis falsos para proteção
	Barragens permeáveis
	Barreiras rígidas e flexíveis

As barragens permeáveis (*check dams*) reduzem os gradientes e minimizam a erosão de fundo e laterais do canal, em contraste com as bermas laterais e de deflexão, cuja função é controlar a trajetória de fluxo e restringir o espalhamento lateral. As bermas ou barreiras terminais são construídas para facilitar a deposição por obstrução do fluxo, além de aumentar o comprimento da trajetória do fluxo, promovendo a dissipação de energia. Também existem estruturas de controle abertas e fechadas conjuntas que podem ser mais eficientes, mas são mais onerosas e sofisticadas. Os túneis falsos protegem as estradas e infraestruturas que se encontram em zonas ou canais onde pode ocorrer o fluxo (NUNES & SAYÃO, 2014). Os parâmetros de projeto a serem considerados dependem da estrutura selecionada, e são específicos para cada local. Eles devem incluir parâmetros do fluxo de detritos, assim como do talvegue e da zona de deposição. Os parâmetros mais comuns são frequência e intensidade ou volume do evento, trajetória preferencial, granulometria dos detritos, distância total percorrida, vazão de pico, espessura na proximidade das estruturas, ângulo de deposição provável e forças de impacto (VANDINE et al., 1997).

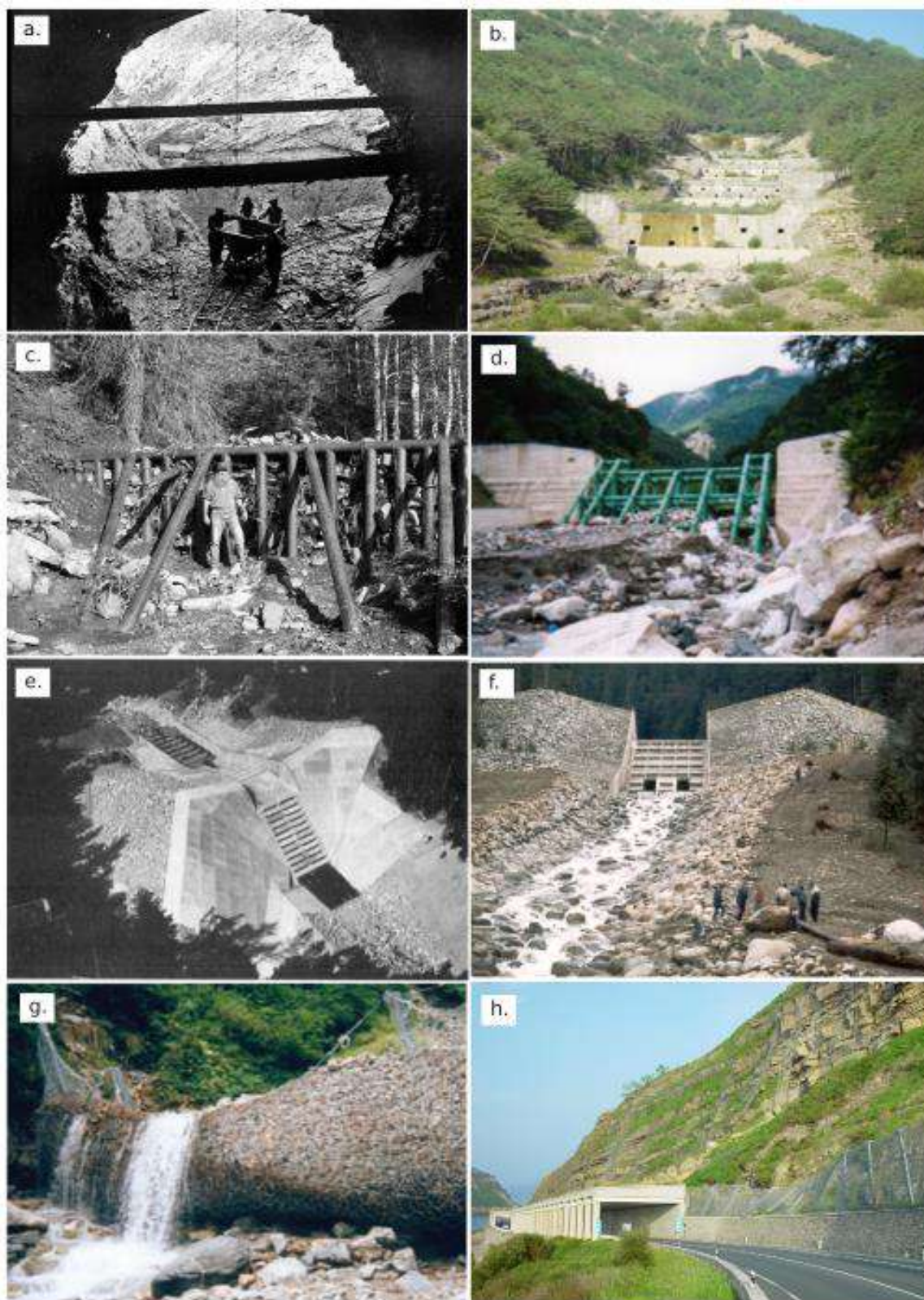


Figura 2.8. Medidas ativas para fluxos de detritos: (a) Túnel de desvio, França (HUEBL & FIEBIGER, 2005); (b) *Check dams*, Espanha (COROMINAS, 2013); (c) *Debris racks*, Colorado, USA (DE WOLFE et al., 2008); (d) Barreiras tubulares, Japão (MISUYAMA, 2008); (e) e (f) Barragem, BC, Canadá (WIECZOREK et al., 1997); (g) Barreira flexível, Japão (VOLKWEIN et al., 2011); (h) Túneis falsos (COROMINAS, 2013).

CAPÍTULO 3

MODELOS DE FORÇAS DE IMPACTO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um eficiente zoneamento de área de risco e um projeto eficiente para conter fluxos de detritos requerem a estimativa de vários parâmetros importantes. Existem alguns parâmetros que podem ser estimados com acurácia por meio de investigações geológicas e por análises de fluxos de detritos que ocorreram no passado, tais como volume total, magnitude do evento, composição dos sedimentos e chuvas deflagradoras. Entretanto, outros parâmetros são mais complexos de determinação e necessitam do auxílio de relações empíricas e complexas simulações numéricas. Dentre esses parâmetros estão a vazão, velocidade do fluxo e, especialmente, força de impacto.

O projeto e dimensionamento das estruturas de proteção contra fluxos de detritos exige o conhecimento da força de impacto. ARMANINI (1997) reclama da ausência de informação na literatura tendo em vista o interesse e a importância do problema. Afirma que as estruturas de proteção como barreiras, *debris racks* e *debris breakers* precisam ser projetadas considerando os impactos dinâmicos.

As forças de impacto geradas pelos fluxos de detritos são muito difíceis de se estimar principalmente porque dependem de muitos fatores que são igualmente difíceis de se obter. HUBL et al. (2009) enfatizam o uso de parâmetros como velocidade, densidade e altura do fluxo e sugerem que não é possível desenvolver modelos de força de impacto baseados em considerações teóricas.

Forças de impacto causadas por eventos reais de fluxos de detritos foram medidas por alguns pesquisadores (ZHANG, 1993; DE NATALE et al., 1999; KÖNIG, 2006; WENDELER et al., 2007; HU et al., 2011; BUGNION et al. 2011). Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas em laboratórios com modelos em escala reduzida, porém uma grande desvantagem é especificamente o efeito de escala.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS

Vários autores consideram que os modelos de força de impacto podem ser classificados em hidráulicos, empíricos, ondas de choque e impacto de corpos sólidos, sendo os hidráulicos os mais usados e que podem ser divididos em hidrodinâmicos e hidrostáticos. A Figura 3.1 ilustra a classificação dos modelos de força de impacto reportados na literatura moderna.

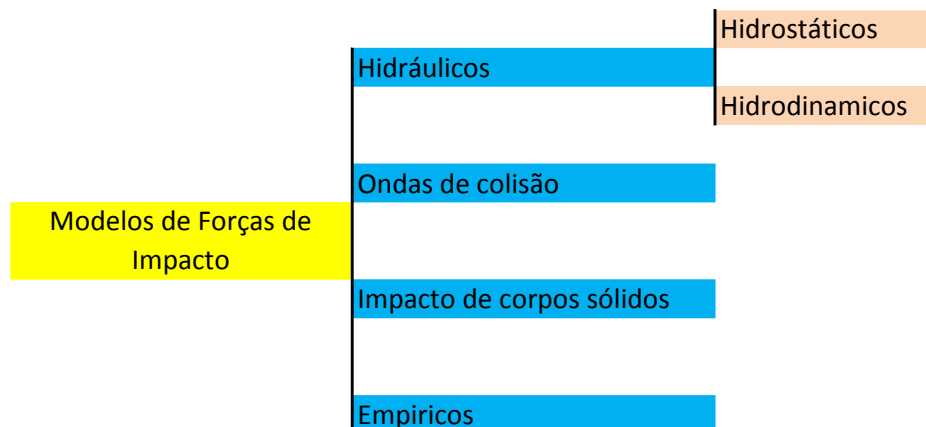


Figura 3.1. Modelos de forças de impacto de fluxos de detritos.

3.2.1. Modelos Hidráulicos

Os modelos hidráulicos são os mais usados para analisar as forças de impacto, e são divididos em modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos. O primeiro modelo hidráulico adotado para fluxo de detritos foi proposto por LICHTENHAHN (1973), o qual considera a força de impacto como uma força hidrostática. Posteriormente diversos autores foram contribuindo, complementando e evoluindo as teorias dos modelos hidráulicos.

MORIGUCHI et al. (2009) reportam que a força de impacto deve ser relacionada a outros fatores tais como a profundidade do fluxo e sua velocidade. Ressalte-se que os modelos hidrostáticos não consideram esses parâmetros, tampouco o impacto dinâmico.

Por outro lado, MIZUYAMA (2008) considera que os modelos hidrodinâmicos são muito limitados, uma vez que o impacto dos fluxos de detritos é transiente e instável e, portanto, não pode ser definido por uma distribuição constante da velocidade.

3.2.1.1. Modelos Hidráulicos – Hidrostáticos

O primeiro modelo hidrostático foi desenvolvido por LICHTENHAHN (1973) e, apesar de sua antiguidade, ainda é empregado com frequência na atualidade. Isto se deve ao fato da relação proposta pelo autor ser simples e prática, exigindo apenas a altura do fluxo de detritos. Saliente-se que normalmente as estruturas de proteção são dimensionadas especificamente como alturas dos fluxos de detritos (HUBL et al., 2009). LICHTENHAHN (1973) propôs a seguinte relação para estimar as forças de impactos de fluxos de detritos:

$$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

k = Fator empírico, com valor entre 2,8 e 4,4;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

SCOTTON & DEGANUTTI (1997) propuseram fatores empíricos (k) diferentes de LICHTENHAHN (1973). Eles usaram uma calha de 9,5m de comprimento com resíduos de carvão e um diâmetro de partícula de 5,7mm, além de diferentes fluidos, para analisar o efeito da viscosidade na força de impacto do fluxo na barreira. A calha era inclinada de 10°, 15° e 20° nos modelos de ensaio. Os resultados são analisados em termos da razão entre a força de impacto medida e a força hidrostática na base da calha. Essa razão apresenta uma ampla variação, com valores compreendidos entre 2,5 e 7,5 e valores médios de 5,3 para fluxos mais viscosos e 3,5 para fluxos menos viscosos.

Na realidade, HUBL et al. (2009) consideram o fator empírico k como um fator de segurança, uma vez que todos os modelos hidráulicos são baseados em fluidos newtonianos e a viscosidade é independente da velocidade. Porém, os fluxos de detritos

são uma mistura de sedimentos e água, e existe uma resistência ao cisalhamento viscoso dependente da velocidade.

3.2.1.2. Modelos Hidráulicos Hidrodinâmicos

ARMANINI (1997) estudou o impacto dinâmico de fluxos de detritos em ensaios de escala reduzida, reconhecendo os modelos que relacionam o impacto dinâmico com o quadrado da velocidade do fluxo, apesar da pouca confiabilidade, uma vez que o fluxo é turbulento.

ARMANINI & SCOTTON (1993) e ARMANINI (1997) observaram dois tipos de mecanismo de impacto do fluxo de detritos sobre uma parede vertical: i. Formação de uma onda completamente refletida; e ii. Formação de uma protuberância vertical, esquematizados na Figura 3.2. No primeiro caso, após o impacto a onda refletida é formada, propagando-se para montante com uma rapidez que pode ser considerada constante perto da parede. No segundo caso, o fluxo é desviado para cima paralelamente à parede vertical, formando-se um jato e, em seguida, um salto hidráulico com propagação para montante.

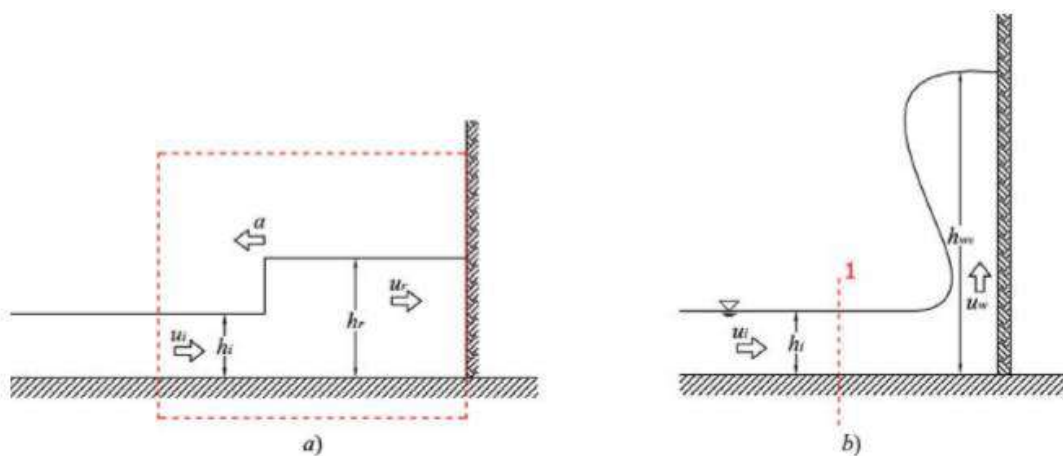


Figura 3.2. Possíveis esquemas do mecanismo de impacto de fluxo de detritos contra uma parede vertical: (a) Formação de uma onda completamente refletida e (b) Formação de uma protuberância vertical (ARMANINI et al., 2011).

Se as forças de atrito prevalecem em relação às forças da gravidade, o fluxo desacelera e forma uma onda refletida. Caso ocorra o contrário, com as forças de gravidade prevalecendo sobre as forças de atrito, o fluxo acelera e forma uma protuberância vertical.

Os resultados obtidos sugerem que o impacto dinâmico do fluxo de detritos em estruturas fixas não depende da altura da parede ou estrutura, mas sim da velocidade. Isto pode explicar a dispersão nas fórmulas práticas propostas pelos autores que tentaram correlacionar a pressão dinâmica à pressão hidrostática (ARMANINI, 1997).

As pesquisas de ARMANINI (1997) e ARMANINI & SCOTTON (1992) permitem determinar a força dinâmica de impacto em termos da pressão hidrostática por meio da expressão:

$$P_{m\acute{a}x} = 9 \frac{1}{2} \rho_{Mu} h_0^2 \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

h_0 = Altura do fluxo de detritos não perturbada a montante em m.

Deve-se lembrar que o modelo de ARMANINI (1997) se baseia na hipótese de fluxo em uma única direção e considera o fluxo como uma mistura homogênea. Entretanto, sabe-se que as instabilidades e as curvaturas afetam a validade da teoria do fluxo em uma direção. Além disto, a presença de materiais grosseiros no fluxo de detritos, tais como os blocos de rocha, afetam a velocidade e a força de impacto. Consequentemente, a aceleração é pobremente reproduzida em modelos de escalas reduzidas como os utilizados por ARMANINI (1997).

Outros modelos hidrodinâmicos levam em conta a velocidade do fluxo de detritos e também adotam um fator empírico. A maioria dos modelos hidráulicos hidrodinâmicos de determinação de pressão de impacto de fluxos de detritos pode ser representada pela seguinte expressão genérica:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

α = Fator empírico.

CUI et al. (2015) consideram que o fator empírico α representa as diferenças do regime do fluxo e as composições granulares de cada fluxo de detrito e, portanto, existe um intervalo de valores para este fator.

Vários autores, destacando-se WATANABE & IKEYA (1981), ZHANG (1993), MIZUYAMA (1979), WENDELER et al. (2007), DU et al. (1986) e BUGNION et al. (2011), concordam com a expressão genérica proposta (Equação 3.3), diferenciando-se unicamente pelo valor do fator empírico e a consideração do ângulo da força de impacto por alguns.

Por exemplo, WATANABE & IKEYA (1981) consideram valores do fator empírico entre 2 e 4, enquanto WENDELER et al. (2007) consideram uma variação entre 0,7 e 2. BUGNION et al. (2011) propõem valores mais reduzidos, compreendidos entre 0,4 e 0,8, com um valor máximo igual a 2 para fluxos de detritos em encostas. Eles afirmam que esse fator depende principalmente das propriedades do fluxo. MIZUYAMA (1979) propõe valores do fator empírico entre 1 e 2, considerando medições *in situ* no Japão.

DU et al. (1986) consideram que a força de impacto depende do fator empírico e também do ângulo da componente da força do fluxo que impacta na estrutura. Propõem um fator empírico igual a 3 e o uso do seno do ângulo da força de impacto na barreira.

ZHANG et al. (1990) mediram em ensaios de campo as forças de impactos de blocos e da pressão do fluxo dinâmico de formas diferentes, empregando células de carga, medidores de deformação do tipo *strain gauges* e sensores piezoelétricos. As mais de 70 medições de forças de impacto forneceram um fator empírico variando entre 3 e 5. Mostraram também que a força de impacto é diretamente proporcional ao cosseno do seu ângulo. Essa variação do fator empírico se deve à densidade da lama que nunca é a mesma, e também ao tamanho dos blocos (ZHANG, 1993).

VANDINE (1996), HUNGR et al. (1984), ISHIKAWA et al. (2008) e CANELLI et al. (2012) acreditam que a força de impacto de fluxos de detritos deve ser uma função da área da seção transversal do fluxo. HUNGR et al. (1984) sugerem a seguinte equação de momento para calcular a força de impacto de fluxos de detritos sobre barreiras:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \cdot \sin \beta \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

A = Área da seção transversal do fluxo em m²;

α = Fator empírico;

β = Ângulo entre a face da barreira e a direção do fluxo.

HUNGR et al. (1984) recomendam um fator de segurança igual a 1,5, levando em consideração a acumulação inicial dos detritos a montante da barreira, os quais formam cunhas de empuxo estático contra a barreira, além da possibilidade do material galgar a barreira devido ao seu preenchimento pelos detritos.

ISHIKAWA et al. (2008) realizaram ensaios em modelo reduzido para a medição da força de impacto do fluxo de detritos. Eles testaram diversas misturas de materiais, água somente, sedimentos e água, e mistura de pedregulhos, sedimentos e água. Os resultados dos ensaios mostraram que a força calculada usando a Equação 3.4 é similar à força resultante obtida depois dos primeiros impactos. Além disto, a máxima força medida nos ensaios é 1,7 a 1,8 vezes maior do que a força calculada com a equação. Consequentemente, o fator de segurança de ISHIKAWA et al (2008) varia entre 1,0 e 1,8, enquanto o HUNGR et al (1984) é 1,5.

CANELLI et al. (2012) também fizeram ensaios em modelos reduzidos, cujos resultados indicaram um fator de segurança entre 1,5 e 5,0, o qual está relacionado com a possível formação de uma protuberância vertical depois do impacto. Embora pouco provável, a ocorrência de tal fenômeno levaria a uma subestimativa do valor de impacto de projeto, e, portanto, um incorreto dimensionamento da barreira. Por esta razão, durante a fase de projeto, o tipo de fluxo, canalizado ou de superfície livre, deve ser correlacionado com o

tipo de barreira instalada, rígida ou flexível. Em adição, o fluxo de detrito deve ser assumido como um fluxo homogêneo.

CANELLI et al. (2012) apresentam a evolução da onda de impacto com o tempo e a magnitude da força de impacto, conforme ilustrado no esquema da Figura 3.3. Observa-se que a força de impacto é maior uma vez formada a protuberância. Porém, imediatamente depois do impacto (B), ocorre um decréscimo da força de impacto, para logo depois aumentar e chegar à força de pico.

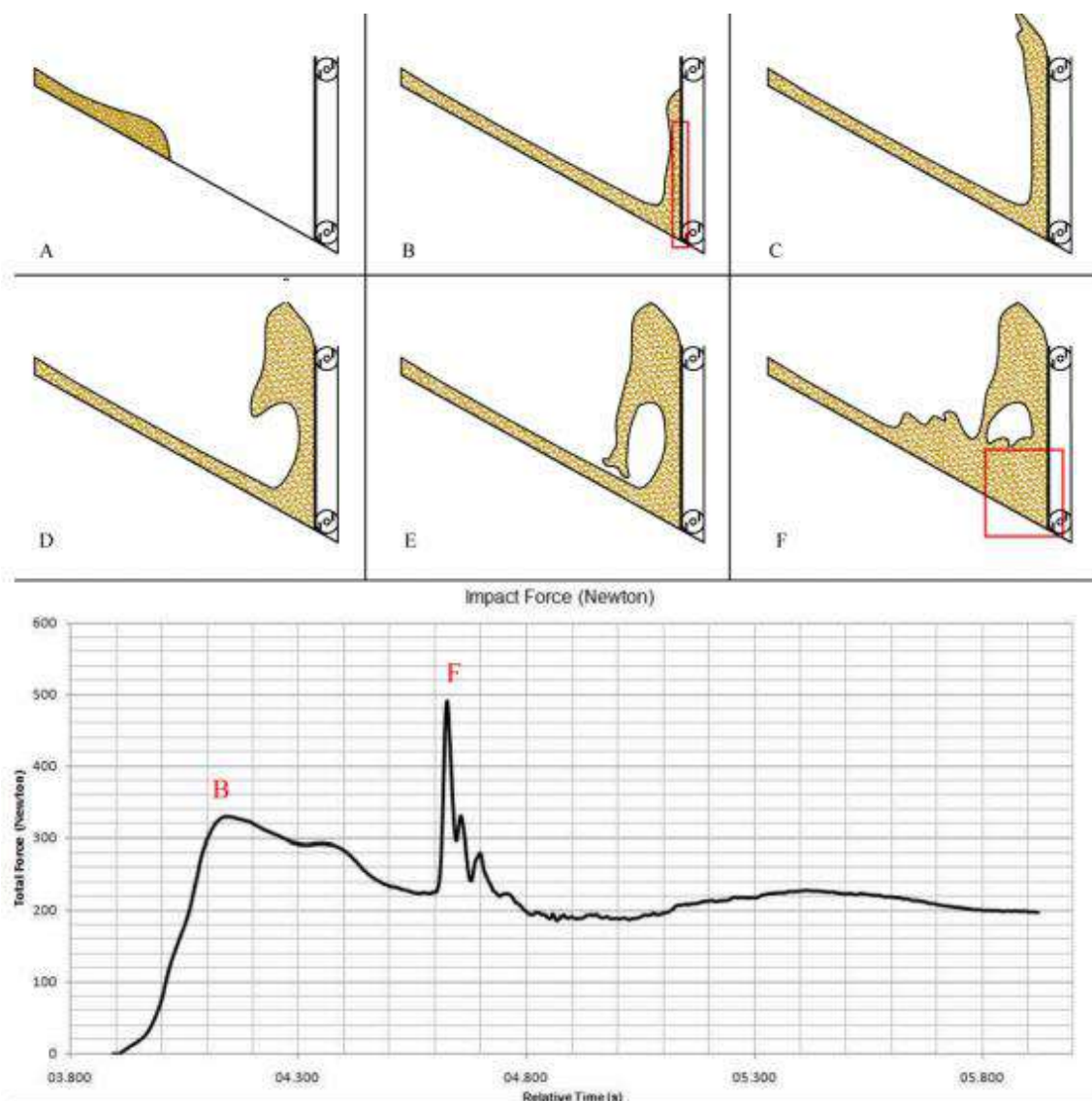


Figura 3.3. Esquema da evolução da onda de impacto com o tempo (A a F) e a variação da força de impacto (CANELLI et al., 2012).

DAIDO (1993) propôs um modelo que considera que a força de impacto depende da densidade, altura e velocidade do fluxo de detrito, afetados pelo fator empírico que varia entre 5 e 12, expresso por:

$$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot h \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3.5}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N/m²;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

α = Fator empírico.

HUBL & HOLZINGER (2003) realizaram ensaios em um modelo reduzido para medição da força de impacto, a qual foi normalizada por meio de formulação hidrodinâmica. Consideraram o Número de Froude que é um número adimensional, que representa uma relação entre a velocidade da correnteza e a velocidade de onda gravitacional, e define os regimes de escoamento do fluxo em crítico, fluvial e torrencial em função do valor do Número de Froude igual a 1, menor que 1 e maior que 1, respectivamente .

Os autores adotaram o Número de Froude, para obter relações livres de escala, o qual foi inserido na expressão para determinação da força de impacto, dada por:

$$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Pressão máxima de impacto do fluxo de detritos em N;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

A Figura 3.4 apresenta valores obtidos de medidas de campo e de laboratório em modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos e relações de forças de impacto, correlacionados com o Número de Froude (HUBL et al., 2009). Observa-se na área retangular à esquerda do gráfico, que representa dados de eventos naturais de fluxos de detritos já ocorridos, que os valores de Número de Froude variam entre 0 e 2. Os valores do Número de Froude obtidos de ensaios em modelos reduzidos, concentrados na área retangular da parte inferior do gráfico variam entre 1,2 e 12. Portanto, os modelos desenvolvidos em laboratório não fornecem valores do Número de Froude compatíveis com os obtidos em eventos reais de fluxos de detritos.

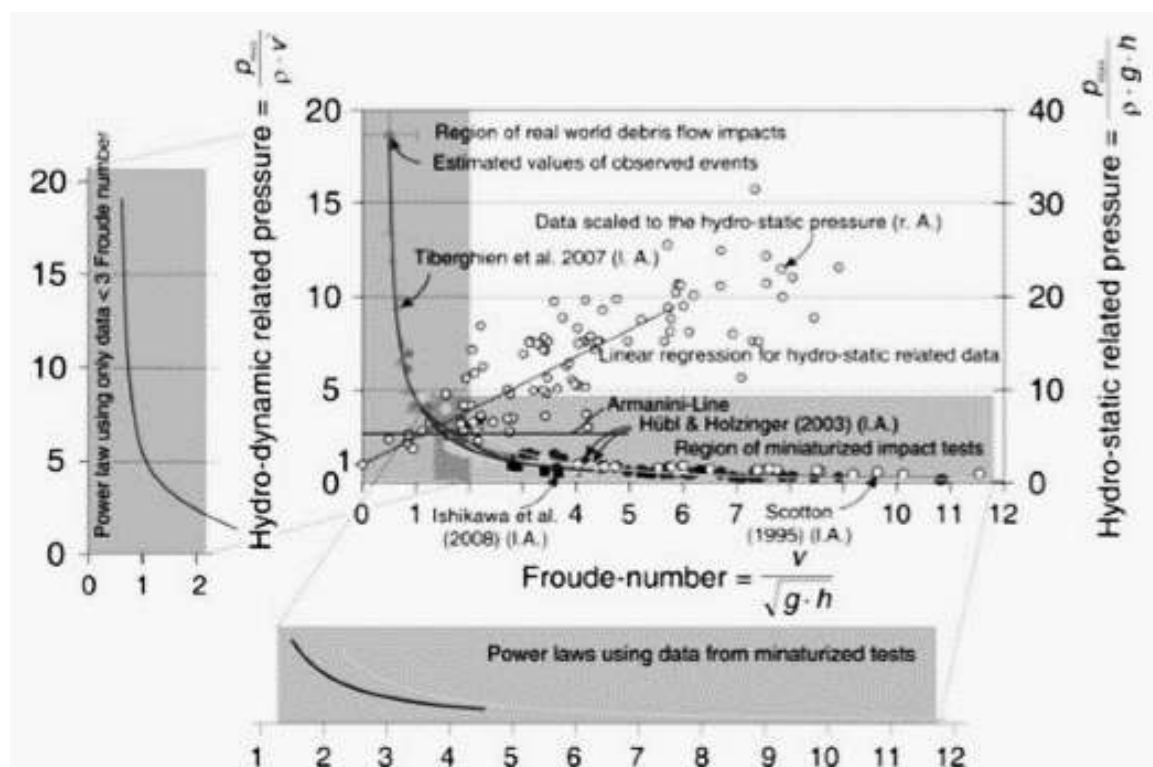


Figura 3.4. Relação entre força de impacto de fluxos de detritos e Número de Froude considerando dados obtidos em campo e laboratório (HUBL et al., 2009).

Da Figura 3.4, pode-se observar que os modelos hidrodinâmicos não são bem representados quando os valores de Número de Froude são reduzidos. Porém, passam a ser bem representados com valores de Froude acima de 2. Em contrapartida, os modelos hidrostáticos são bem representados com valores baixos do Número de Froude, indicativos de regime de fluxo fluvial ou subcrítico.

Os modelos hidrodinâmicos podem ser comparados com os hidrostáticos por meio do Teorema de Bernoulli, permitindo a obtenção de valores empíricos de k com a expressão:

$$a \cdot \rho_{Mu} \cdot \frac{v^2}{2} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 3.7}$$

A Tabela 3.1, proposta por HUBL et al. (2009), apresenta os valores do fator empírico k para os diferentes modelos assumindo a Equação 3.7 e o Número de Froude igual a 1. Note-se que os valores de k da tabela devem ser somente usados para a comparação entre os modelos hidrostáticos. Ao se comparar os valores do fator empírico da Tabela 3.1, conforme propostos pelos diferentes autores, observa-se que o fator empírico é duplicado nos modelos hidrodinâmicos.

Tabela 3.1. Estimativas do fator empírico k para diferentes modelos (HUBL et al., 2009).

Autor	Fator Empirico k	Observações
Kherkheulitze	1	Valores médios, não valores maximos
Vandine	1,25 x A	Dificuldade ao intrudizer a área
Watanabe & Ikeya	4	
Lichtenhahn	2,8 - 4,4	Transferencia da densidade da agua para densidade do fluxo de detritos
Armanini	5	
Zhang	6 - 10	Medições em campo
Hubl & Holzinger	7,5	Dificuldade nos exponentes
Tiberghien	13,5	Ensaio modelos reduzidos
Aulitzky	25 - 50	Velocidade da onda de colisão é estimada

O padrão de carregamento de uma estrutura de proteção atingida por fluxo de detritos é essencial para a determinação da máxima força de impacto. A Figura 3.5 apresenta diferentes padrões de carregamentos para impactos de fluxos de detritos. O padrão de carregamento sugerido por HUBL et al. (2009) considera um possível fluxo de detritos em várias ondas sucessivas, preenchendo o espaço de depósito na frente da barreira de proteção.

CUI et al. (2015) desenvolveram um modelo reduzido no qual consideram que a força de impacto, além de depender do Número de Froude, também depende do Número de

Reynolds. Comparam os dados obtidos no modelo com os resultados observados em campo na *Ravina Jiangjia*, conforme apresentado na Figura 3.6. Os autores observam que o regime do fluxo e o processo de impacto podem ser divididos em três etapas:

- i. Impacto rápido e de grande magnitude da cabeça do fluxo de detritos em regime turbulento;
- ii. Impacto contínuo e estável do corpo do fluxo de detritos em regime laminar;
- iii. Pressão estática da parte final do fluxo de detritos.

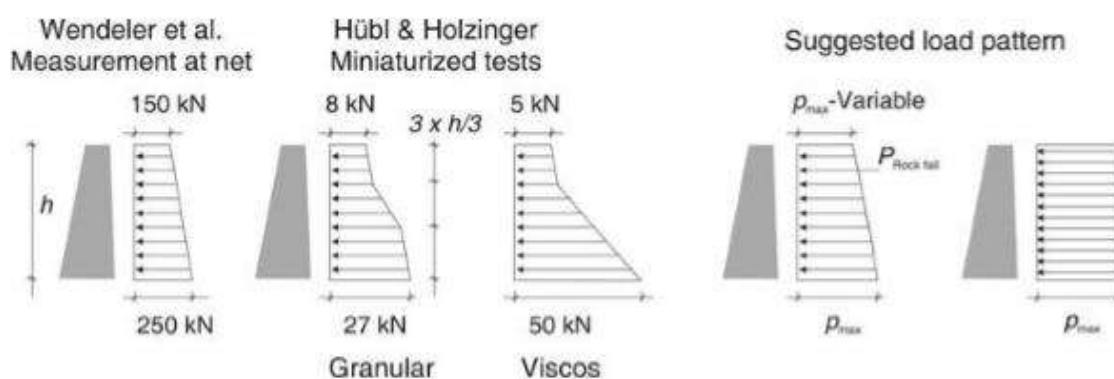


Figura 3.5. Diferentes padrões de carregamento para impactos de fluxos de detritos (HUBL et al., 2009).

Os padrões de carregamento apresentados por CUI et al. (2015), na Figura 3.7, são baseados na hipótese de um impacto contínuo do fluxo que varia com o tempo. O primeiro momento é quando o fluxo de detritos atinge a estrutura com regime turbulento e o ponto de contato está a $1/3$ da profundidade. Em seguida, existe uma pressão dinâmica contínua na estrutura que leva à deformação com a carga de distribuição trapezoidal. Finalmente, ocorre um decréscimo da velocidade. Importante notar que, caso seja considerado somente o impacto rápido do fluxo de detritos, e ignorado o processo do impacto contínuo, o carregamento das barreiras tende a ser subestimado, colocando em risco o desempenho da estrutura de proteção.

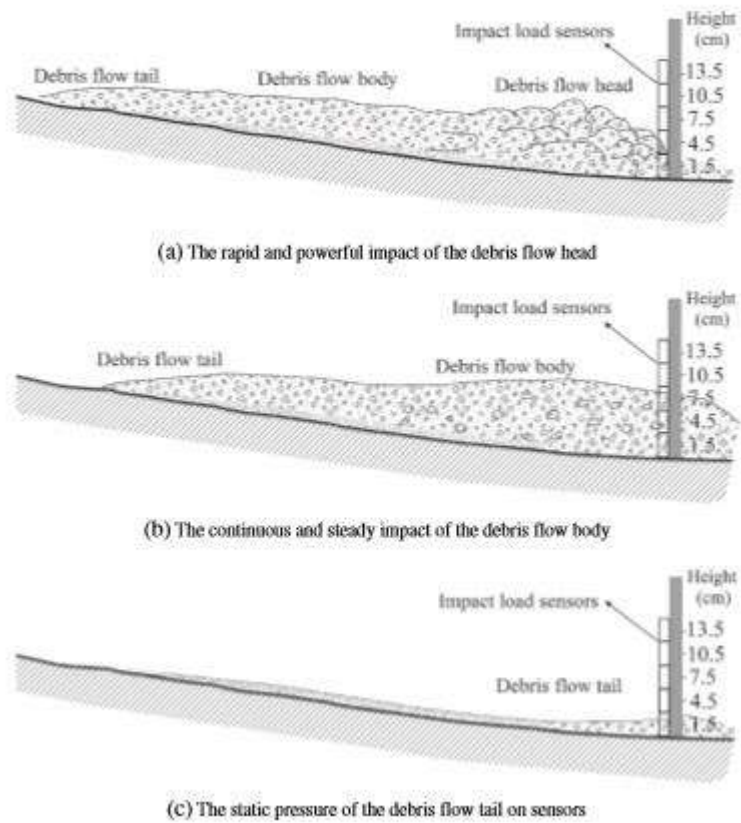


Figura 3.6. Processos de impacto de fluxo de detritos medidos com sensores (CUI et al., 2015).

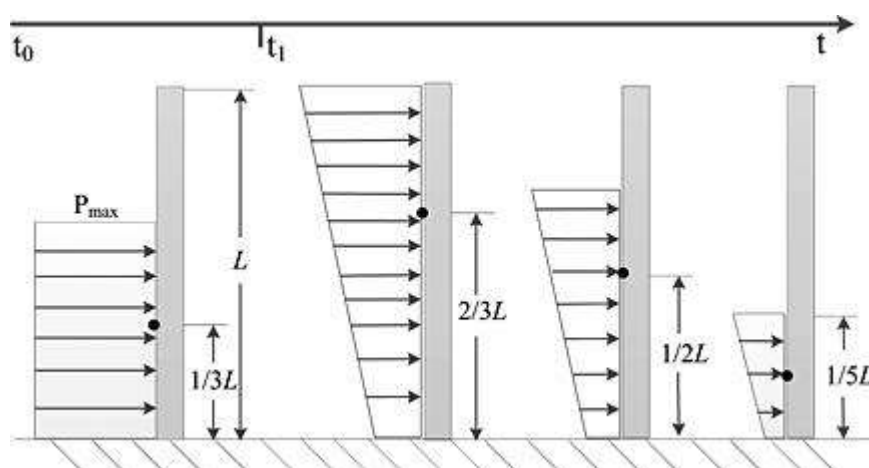


Figura 3.7. Padrões simplificados de carregamento de impacto de fluxos de detritos em estruturas (CUI et al., 2015).

ZANUTTIGH & LAMBERTI (2006) e HUBL et al. (2009) consideraram o Número de Froude para calcular a força de impacto. ZANUTTIGH & LAMBERTI (2006) também inserem o fator C_c , que é um fator empírico que tem que ser calibrado considerando a aceleração vertical dos materiais. Desta forma, os autores propõem que a força de impacto seja determinada por:

$$P_{m\acute{a}x} = C_c \frac{(1+\sqrt{2}Fr)^2}{2} g \rho_{Mu} \cdot h^2 \quad \text{Eq. 3.8}$$

HUBL et al. (2009) substituem o fator empírico α e acrescentam mais dois fatores (a e b), resultando na expressão:

$$P_{m\acute{a}x} = aFr^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3.9}$$

ARMANINI et al. (2011) continuaram com as pesquisas da força de impacto e mais recentemente, consideraram o Número de Froude com a hipótese de que, no momento do impacto, a distribuição de pressão na parede é hidrostática. Das análises realizadas, os autores observaram que são produzidos dois tipos de fluxos em um mesmo impacto: a formação de uma onda completamente refletida e a formação de uma protuberância vertical, e por isto é chamado de “esquema de duas fases”. Propõem a expressão para determinação da força de impacto:

$$F^- = \frac{0,5(g\rho_{Mu}h_{Mu}^2) + \psi\rho_{Mu}v^2h_{Mu}}{0,5(g\rho_{Mu}h_{Mu}^2)} = \left\{1 + \frac{Fr^2}{2}\right\} \left\{1 + \frac{\psi Fr^2}{1+0,5Fr^2}\right\} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Onde:

F^- = Força de impacto adimensional;

ψ = Parâmetro de ajuste, usualmente igual a 1;

Fr = Número de Froude;

ρ_{Mu} = Densidade do fluxo de detritos em kg/m³;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

g = Gravidade em m/s²;

h_{Mu} = Altura do fluxo de detritos em m.

CUI et al. (2015) desenvolveram um banco de dados com mais de 155 amostras (Figura 3.8) e considerando um modelo de regressão hidrodinâmica, conseguiram determinar os valores dos coeficientes da seguinte expressão de pressão de impacto:

$$P_{m\acute{a}x} = 5,3Fr^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3.11}$$

Ressalte-se que as amostras utilizadas para obtenção da Equação 3.11 tem valores de Número de Froude entre 0,6 e 10,8.

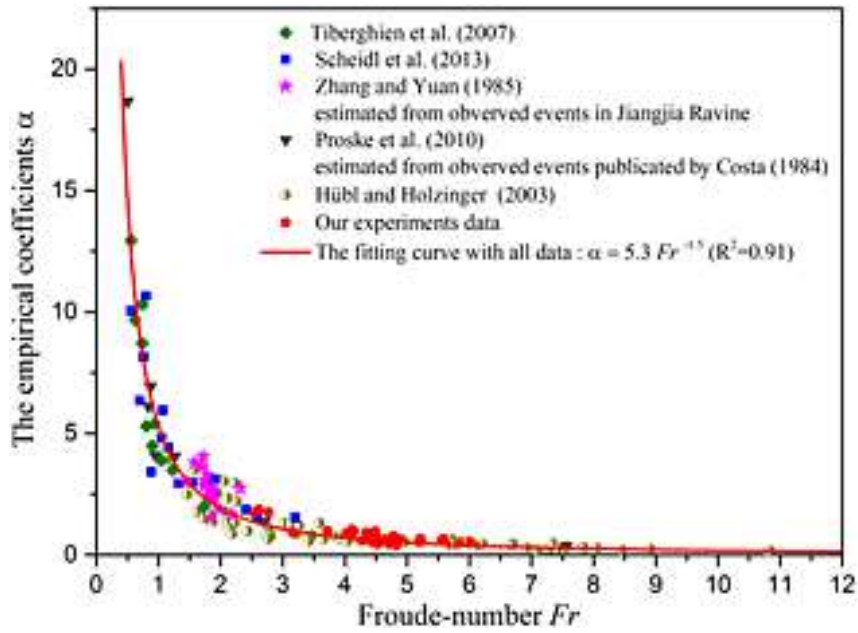


Figura 3.8. Relação entre o coeficiente empírico α e o Número de Froude (CUI et al., 2015).

SCHEIDL et al. (2013) investigaram o Número de Froude e suas correlações com os coeficientes empíricos dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos, e determinaram que a expressão geral dos modelos de impacto dinâmico representa melhor o impacto dos fluxos de detritos, quando comparados aos modelos hidrostáticos.

HE et al. (2016) apresentaram um modelo de força de impacto que associa a influência da lama, pedregulho e blocos de rocha no fluxo de detritos. A distribuição do padrão de carregamento depende do tipo do fluxo de detritos: viscoso e diluído, apresentados na Figura 3.9 e Figura 3.10, respectivamente.

CUI et al. (2015) desenvolveram um modelo reduzido no qual consideram que a força de impacto, além de depender do Número de Froude, também depende do Número de Reynolds. Comparam os dados obtidos no modelo com os resultados observados em campo na *Ravina Jiangjia*, conforme apresentado na Figura 3.6. Os autores observam que o regime do fluxo e o processo de impacto podem ser divididos em três etapas:

- i. Impacto rápido e de grande magnitude da cabeça do fluxo de detritos em regime turbulento;
- ii. Impacto contínuo e estável do corpo do fluxo de detritos em regime laminar;
- iii. Pressão estática da parte final do fluxo de detritos.

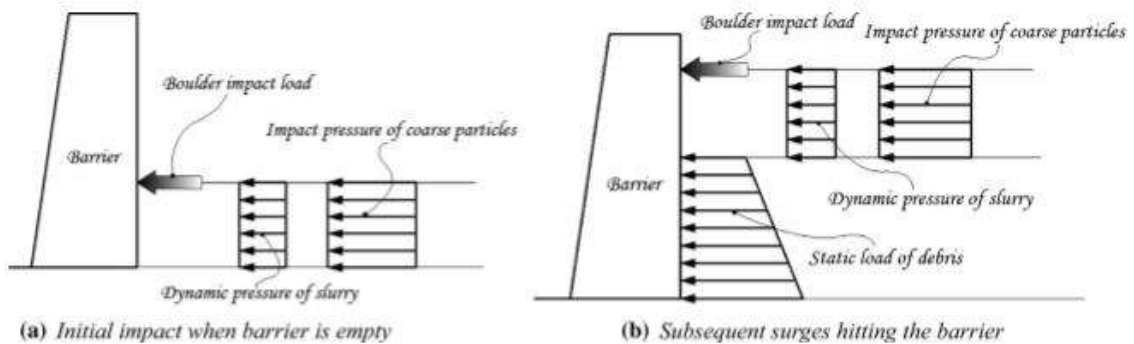


Figura 3.9. Padrão de carregamento do fluxo de detritos viscoso (HE et al., 2016).

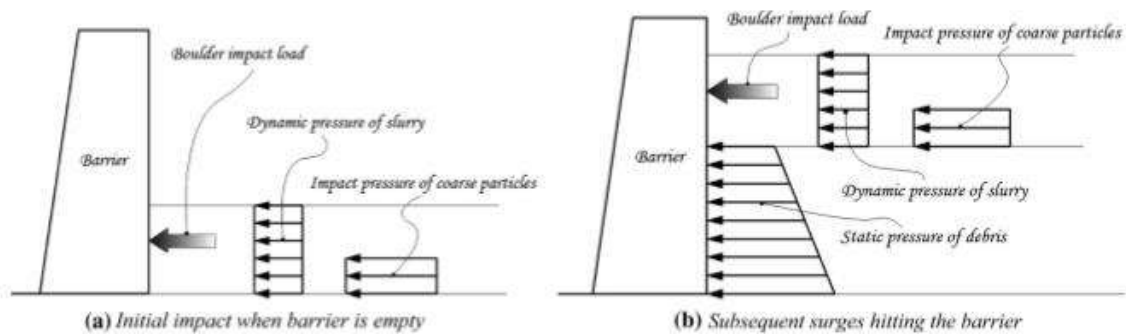


Figura 3.10. Padrão de carregamento do fluxo de detritos diluído (HE et al., 2016).

As forças de impacto dos pedregulhos podem ser determinadas por:

$$P_g = 0,964E^{0,4}\rho_s^{0,6}v_s^{1,2}\varphi \quad \text{Eq. 3.13}$$

Onde:

P_g = Força de impacto dos pedregulhos;

ρ_s = Densidade dos pedregulhos no fluxo de detritos kg/m³;

E = Módulo de elasticidade;

v_s = Velocidade em m/s;

Φ = volume de fração sólida do fluxo de detritos.

3.2.1.3. Modelos Hidráulicos mistos

Alguns modelos hidráulicos da literatura podem ser chamados de mistos uma vez que associam características dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos. Dentre esses modelos, destacam-se os propostos por KHERKEULITZE (1967) e ARATTANO & FRANZI (2003).

O modelo de ARATTANO & FRANZI (2003) se baseia em dados de campo obtidos por instrumentação do comportamento dinâmico de um fluxo de detrito nos alpes italianos. Eles usam diferentes alternativas computacionais, resultando na proposta de um modelo matemático. Este modelo assume uma massa homogênea de água - sedimento sobre uma base rígida. Não considera efeitos de deposição nem assoreamento ao longo do canal, e o processo de propagação é assumido como monodimensional. Aplicando leis de conservação de momento e resolvendo equações diferenciais parciais, a força de impacto do fluxo de detritos é definida pela seguinte equação adotada de ARMANINI & SCOTTON (1993):

$$|F| = |F1| + |F2| = \rho Q |V| + \frac{1}{2} g \rho h^2 \quad \text{Eq. 3.14}$$

Onde:

Q = Descarga água-sedimento em m³/s ;

$|V|$ = Velocidade média em m/s;

ρ = Massa específica em kg/m³;

g = Gravidade em m/s²;

h = Altura da estrutura em m.

A primeira parcela da equação depende de dois parâmetros reológicos da simulação: c que depende da concentração de sedimentos e n que depende do comportamento reológico do fluido. Esses parâmetros podem ser calibrados por modelagens numéricas ou calculados com auxílio de teorias propostas por PIERSON & COSTA (1987), RICKENMANN (1999), TAKAHASHI (1991), TAKAHASHI & NAKAGAWA (1993), HONDA (1997), HIRANO et al. (1997), SUZUKI et al. (1993). A segunda parcela da equação é associada ao modelo hidrostático de ARMANINI & SCOTTON (1993).

SEGALINI et al. (2013) propuseram um método considerando três componentes de forças aplicadas em barreiras flexíveis, as quais são geradas em sequência após o impacto do fluxo de detritos, a saber: força dinâmica, força estática e força de arraste. A força dinâmica é produzida pelo impacto do fluxo de detritos; depois os detritos vão se acumulando na barreira produzindo uma força estática. Quando a altura dos detritos ultrapassa a barreira é produzida a força de arraste. As forças dinâmica, estática e de arraste são expressas respectivamente por:

$$P_1 = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$P_2 = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu} \quad \text{Eq. 3.16}$$

$$P_3 = \tan\phi \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_d \quad \text{Eq. 3.17}$$

Onde:

$\phi' = \text{Ângulo de atrito do fluxo;}$

$h_d = \text{Altura do fluxo de detritos que ultrapassa a barreira em m;}$

$\alpha = \text{Fator empírico recomendado igual a 2;}$

$k = \text{Coeficiente de empuxo de terra igual a 1.}$

VAGNON & SEGALINI (2016) estudaram a força de impacto contra uma parede rígida. A Figura 3.11 apresenta o esquema do modelo desenvolvido. Um dos principais problemas deste modelo é a quantidade de dados de entrada para cada tipo de força, conforme as expressões:

$$F_{max} = F_{stat} + F_{dyn} \pm F_{drag} \quad \text{Eq. 3.18}$$

$$F_{stat} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \rho \cdot K_a \cdot (H_{max}^2 - h_f^2) \cdot B \cdot \cos\theta \quad \text{Eq. 3.19}$$

$$F_{dyn} = \alpha \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot \cos\beta \quad \text{Eq. 3.20}$$

$$F_{drag} = g \cdot \rho \cdot h_f \cdot \tan\phi' \cdot \cos\beta \cdot \cos\theta \cdot B \cdot \frac{H_{max} - h_f}{\sin\theta} \quad \text{Eq. 3.21}$$

Onde:

F_{stat} = Força ativa do solo em kN;

F_{dyn} = Força dinâmica em kN;

F_{drag} = Força de arraste em kN;

g = Gravidade em m/s²;

ρ = Densidade do material em kg/m³;

K_a = Condição ativa de Rankine;

H_{max} = Altura máxima do fluxo de detritos contra a barreira em m;

h_f = Profundidade do fluxo de detritos em m;

v = Velocidade do fluxo de detritos em m/s;

θ = Ângulo da encosta;

β = Ângulo entre a barreira e a normal da superfície do canal;

ϕ' = Ângulo de atrito do fluxo;

A = Área da seção transversal;

B = Comprimento horizontal da barreira em m.

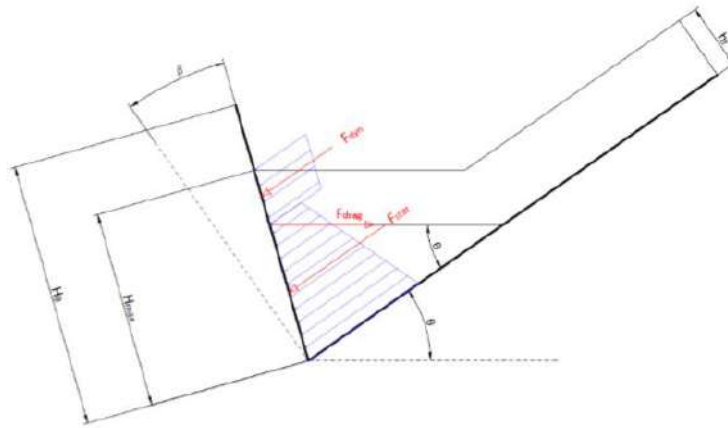


Figura 3.11. Esquema do modelo de VAGNON & SEGALINI (2016).

3.2.2. Modelos Empíricos

Os modelos empíricos para estimar a força de impacto em barreiras geralmente assumem uma pressão hidrostática distribuída associada a um fator empírico de impacto (LO, 2000).

THURBER CONSULTANTS LTD (1984) projetaram barreiras na Suíça e na Áustria como a seguinte equação:

$$P = \frac{\alpha \rho_w g d^2}{2} \quad \text{Eq. 3.22}$$

Onde:

P = Força de impacto (kPa);

α = Fator empírico de impacto;

ρ_w = Densidade da água (kg/m³);

g = Gravidade (m/s²);

d = Altura do fluxo contra a barreira (m).

O fator empírico varia entre 3 a 5 nas barreiras na Áustria e na Suíça possui um valor fixo de 3. A base dessa abordagem empírica não é bem documentada, mas pode ser comparada com resultados de medições reportadas na literatura.

WU et al. (1993) propõem a Tabela 3.2 para estimar a força de impacto para o dimensionamento de barreiras na Rússia. A força de impacto depende da magnitude do fluxo de detritos, da profundidade do fluxo e do diâmetro do maior bloco do fluxo de detritos.

Tabela 3.2. Valores de forças de impacto derivados de fluxos de detritos estudados na Rússia (WU et al., 1993).

Magnitude do Fluxo de detritos	Maxima Profundidade do Fluxo (m)	Diametro maior de Bloco (m)	Força de Impacto (kPa)
Pequeno	< 2	< 0,5	50 -60
Meio	2 - 3	< 0,7	70 - 80
Meio - grande	3 - 5	< 1,5	90 - 100
Grande	5 - 10	2,5-3	110 - 150
Gigante	> 10	< 3	150 - 300

YU (1992) propõe um modelo empírico considerando a mudança dinâmica do fluxo para estimar a máxima força de impacto do fluxo de detritos, sendo proposta a equação:

$$P = \sqrt{D_{max}} \rho \frac{v^2}{2g} \quad \text{Eq. 3.23}$$

Onde:

P = Força de impacto (kPa);

ρ = Densidade do fluxo (kg/m³);

v = Velocidade do fluxo (m/s);

D_{max} = Maior diâmetro do fluxo (m);

g = Gravidade (m/s²).

Comparações feitas com o modelo proposto por YU (1992) resultam em forças de impacto subestimadas dramaticamente (HUBL et al., 2007).

3.2.3. Modelos de Impacto de corpos sólidos

Esses modelos são baseados nos modelos de Hertz assumindo o comportamento elástico do material. Porém, existem modelos alternativos considerando o comportamento viscoelástico e elastoplástico, tais como apresentados por KUWABARA & KONO (1987), LEE & HERMANN (1993), WALTON & BRAUN (1986) e THORTON 1997). Também são encontradas algumas pesquisas que empregam modelos de Kelvin-Voigt, baseados no sistema de molas.

O pioneiro dos modelos de impacto de corpos sólidos foi proposto por CUNDALL & STRACK (1979), que fizeram modelagens de elementos discretos de fluxos aplicados para geofísica, astrofísica e sistemas industriais.

LEE & HERMANN (1993) consideram que a interação entre grãos é muito complicada para construir modelos no qual todas as propriedades de um sistema granular possam ser descritas com acurácia. Consideram ainda que é muito mais vantajoso identificar os componentes básicos do sistema e, a partir daí, construir um modelo que considera a repulsão entre duas partículas em contato e a dissipação da energia durante a colisão. Em alguns casos, a rotação de partículas pode ser importante.

Segundo STEVENS & HRENYA (2005), esses modelos podem ser divididos em duas categorias: modelos de esferas duras e modelos de esferas moles. No primeiro, a colisão entre as partículas é assumida como instantânea e de natureza binária. Já o modelo de esferas moles considera o multi-contato de partículas, acompanhando a dinâmica do contato entre partículas e, devido a sua complexidade, as forças são simplificadas para descrever a fase de contato.

Os modelos de força de impacto de corpos sólidos para fluxo de detritos são definidos como modelos de esferas moles, porque têm a vantagem de serem aplicados para vários sistemas, incluindo fluxos rápidos e fluxos lentos. No entanto, a principal desvantagem é seu alto custo computacional e a determinação dos parâmetros de entrada.

Na Tabela 3.3 encontram-se resumidos os modelos de esferas moles mais conhecidos com suas características de tipo de regime, dados de entrada e leis de forças. Os sub-índices 1 e 2 correspondem às propriedades das partículas 1 e 2, respectivamente. A variável m é a massa e F_n é a força normal experimentada pela partícula durante o contato. O parâmetro ξ corresponde ao fator de sobreposição e é definido pela seguinte equação:

$$\xi = \max(0, R1 + R2 - |r2 - r1|) \quad \text{Eq. 3.24}$$

Onde r refere-se à posição do centro da partícula.

Observa-se da Tabela 3.3 que os modelos de esferas moles são de complexa utilização, tanto pela dificuldade de determinação dos parâmetros de entrada dos modelos, quanto pelas propriedades das leis de força, o que os torna pouco comuns na engenharia de proteção contra fluxos de detritos.

Tabela 3.3. Características dos modelos de esferas moles e leis de forças (STEVENS & HRENYA, 2005).

Nome	Abreviatura	Regimem	Input	Lei de forças
Kuwabara & Kono	KK	Visco elástico	\tilde{k}_n, γ_{n2}	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2} + \gamma_{n2} \xi^{1/2} d\xi/dt$
Lee & Hermann	LH	-	\tilde{k}_n, γ_{n3}	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2} + \gamma_{n3} m_{\text{eff}} V_n$
Walton & Braun e constante	WBCE	Elasto plástico	k_L, k_U	$F_{n,\text{loading}} = k_L \xi; F_{n,\text{unloading}} = -k_U(\xi - \xi_0);$
Walton & Braun e variável	WBVE	Elasto plástico	k_L, S	$F_{n,\text{loading}} = k_L \xi; F_{n,\text{unloading}} = (k_L + SF_{\text{max}})(\xi - \xi_0);$
Thornton	T	Elasto plástico	\tilde{k}_n, p_y	$F_{n,\text{elastic loading}} = \tilde{k}_n \xi^{3/2}; F_{n,\text{plastic loading}} = F_y + \pi p_y R_{\text{eff}}(\xi - \xi_y); F_{n,\text{elastic unloading}} = \tilde{k}_n(\xi - \xi_p)^{3/2};$
Hertz		Elástico	$\tilde{k}_n = \frac{4}{3} \sqrt{R_{\text{eff}}} E_{\text{eff}}$	$F_n = \tilde{k}_n \xi^{3/2}$
Mola linear	LSD	-	k_n, β_n	$F_n = k_n \xi + \beta_n \gamma_{n,\text{crit}} d\xi/dt$

3.2.4. Modelos de Ondas de colisão

Na literatura apresenta raros modelos de ondas de colisão, podendo-se reportar somente os modelos propostos por AULITZKY (1989), que considera teoricamente a velocidade das ondas de choque nos fluxos de detritos. Cabe concluir que, na prática, a obtenção da velocidade das ondas de choque em eventos reais de fluxo de detritos é extremadamente difícil, se não impossível.

3.3. IMPACTO DE BLOCOS

Alguns autores consideram importante o impacto dos blocos visto que os esforços gerados podem ser maiores que os produzidos pelo impacto do fluxo de detrito (MIZUYAMA, 1979; YAMAGUCHI, 1985; HUANG et al., 2007; HE, 2010; HUNGR et al., 1984; ZHANG, 1993; LIEN, 2002). HE et al. (2016) consideram que, quando bloco flutua sobre a lama do fluxo de detrito, a velocidade do bloco é igual a velocidade do fluxo de detritos; porém, quando o bloco se desloca independentemente do fluxo de detritos, sua velocidade é menor.

YAMAGUCHI (1985), MIZUYAMA (1979), LIEN (2002) e HUANG et al. (2007) consideram que a força de impacto do bloco é derivada da teoria da colisão elástica, porém pode ser melhor estimada quando são realizadas investigações de campo e testes em modelos reduzidos. A Tabela 3.4 apresenta as forças de impacto estimada pelos autores, onde F é a força de impacto (kN), U é a velocidade do bloco (m/s) e R é o diâmetro do bloco (m).

Tabela 3.4. Modelos de força de impacto de blocos.

Autor	Modelo	Observação
Mizuyama (1979)	$F = 241 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
	$F = 48,2 U^{1,2} R^2$	Modificada por dados de campo
Yamaguchi (1985)	$F = 426 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
	$F = 50 U^{1,2} R^2$	Modificada por dados de campo
Lien (2002)	$F = 80,8 U^{1,2} R^2$	Baseado na teoria da colisão elástica
Huang et al (2007)	$F = 30,8 U^{1,2} R^2$	Modificada por modelos reduzidos

HUNGR et al. (1984) consideram que o impacto dos blocos pode ser importante no dimensionamento de alguns elementos estruturais e depende principalmente do momento produzido pela maior partícula. Sugerem que seja assumida uma esfera com diâmetro igual ao da profundidade do fluxo. As forças de impacto podem ser estimadas usando a Equação de Hertz, mas os resultados são muito conservadores. Portanto, preferem usar a energia cinética do bloco e a deflexão da estrutura para a determinação da força de impacto, dada por:

$$F = \sqrt{M U^2 K} \quad \text{Eq. 3.25}$$

Onde:

F = Força de impacto em kN;

U = Velocidade em m/s;

K = Fator de rigidez da estrutura;

M = Massa do bloco em kg.

ZHANG (1993) propôs modelos de força de impacto de blocos em função do tipo de estrutura de contenção e da mecânica dos materiais, divididos em vigas em balanço (colunas, pontes e píer) e vigas simplesmente apoiadas (barragens e blocos).

O modelo para a viga em balanço é expresso por:

$$F = \sqrt{\frac{3 E J G V^2 \cos^2 \beta}{g L^3}} \quad \text{Eq. 3.26}$$

O modelo para a viga simplesmente apoiada é expresso por:

$$F = \sqrt{\frac{48 E J G V^2 \cos^2 \beta}{g L^3}} \quad \text{Eq. 3.27}$$

Onde:

E = Módulo de elasticidade da estrutura (Kg/m²);

J = Momento de inércia (m⁴);

G = Peso do bloco submergido no fluxo de detritos (kg);

V = Velocidade do bloco (m/s);

G = aceleração da gravidade (m/s²);

L = Comprimento da estrutura (m);

β = Ângulo entre a face da estrutura e a direção do fluxo.

Em contrapartida, HE (2010) propõe um modelo baseado na teoria de contato de Hertz, considerando as deformações elásticas e plásticas da barreira. O modelo conta com os coeficientes c e n que descrevem a característica do material da estrutura de proteção, e a força de impacto é dada por:

$$F = C \left[\frac{M v^2 (n+1)}{2c} \right]^{n/(n+1)} \quad \text{Eq. 3.28}$$

Os impactos de blocos contra estruturas originam elevadas forças de impacto. Para modelar esses impactos é necessário ter mais informações sobre a rigidez e resistência das estruturas. Por conseguinte, a modelagem por forças não seria mais possível e o modelo aumentaria sua complexidade. Esses modelos não seriam aplicáveis em condições práticas, além disso, exigiriam extensos dados de entrada (HUBL et al., 2009).

Por outra parte, CANELLI et al. (2012) acreditam que as barreiras flexíveis permitem uma redução dos efeitos dos blocos devido à grande área de contato entre a barreira e o bloco.

3.4. DIFERENTES CENÁRIOS

Frequentemente, os fluxos de detritos, além dos detritos e da água, apresentam blocos de rocha entre seus materiais. Normalmente, os blocos de rocha são os primeiros a produzir o impacto, seguido dos outros materiais que formam os fluxos de detritos. VANDINE (1996) reporta que as cargas de impacto de cada material que se choca em uma estrutura vão diminuindo progressivamente devido ao depósito de detritos que atingem a barreira nos primeiros momentos.

Pesquisas de LO (2000) e ASI (2011) mostram que o primeiro impacto de bloco de rocha assim como todos os impactos seguintes devem ser considerados para dimensionamento das barreiras. Portanto, o impacto dos blocos de rocha e de outros detritos deve ser considerado separadamente baseados nas abordagens pseudo-estáticas.

NILIM (2007), no Japão, recomenda que a carga de dimensionamento deve considerar uma superposição das forças de impacto dos blocos e os detritos. SWCB (2005), na China, considera que as estabilidades das barreiras devem ser analisadas contemplando o

impacto dos blocos e dos detritos separadamente. Primeiro considera-se o impacto do fluxo de detritos sem os blocos, e depois considera-se o impacto de um bloco no topo da barreira.

Outra abordagem foi a proposta por SUN et al. (2005) que consideram que o volume do fluxo de detritos deve ser dobrado para o dimensionamento de barreiras rígidas, que admitem um deslocamento de 1,5 m. Esse volume dobrado do fluxo de detrito é considerado um fator de segurança relacionado ao grau de incerteza da estimativa do volume.

KWAN (2012) reúne diversas abordagens de vários autores e entidades governamentais que têm pesquisado os diferentes cenários de impacto dos fluxos de detritos e faz as seguintes recomendações para o dimensionamento de estruturas de proteção em diferentes cenários:

- i. Já que o fluxo de detritos pode atingir a barreira em forma de pulsos, múltiplos ciclos de carga devem ser considerados para dimensionar a estrutura (Figura 3.12). Portanto, o primeiro ciclo de carga (primeiro pulso) deve ser adotado para os seguintes com o objetivo de reforçar a barreira;
- ii. No caso da presença de blocos de rocha no fluxo de detritos, eles devem ser considerados em todos os ciclos de carregamento, especialmente no primeiro ciclo (pulso). O impacto do bloco deve ser dividido pela largura da barreira, adotando-se aquele com maior diâmetro;
- iii. O dimensionamento deve contemplar a possibilidade do fenômeno de galgamento (ultrapassagem) da barreira e, conseqüentemente, a força de arraste (Figura 3.13);
- iv. O dimensionamento deve considerar as pressões estáticas de solo e água ao longo da barreira (Figuras 3.12 e 3.13). O coeficiente de pressão lateral de terra é considerado 1 e os detritos são semelhantes a uma lama espessa;
- v. Na possibilidade de uma queda de bloco, a barreira deve ser revisada para resistir ao impacto do bloco, além do impacto de blocos na massa do fluxo de detritos.

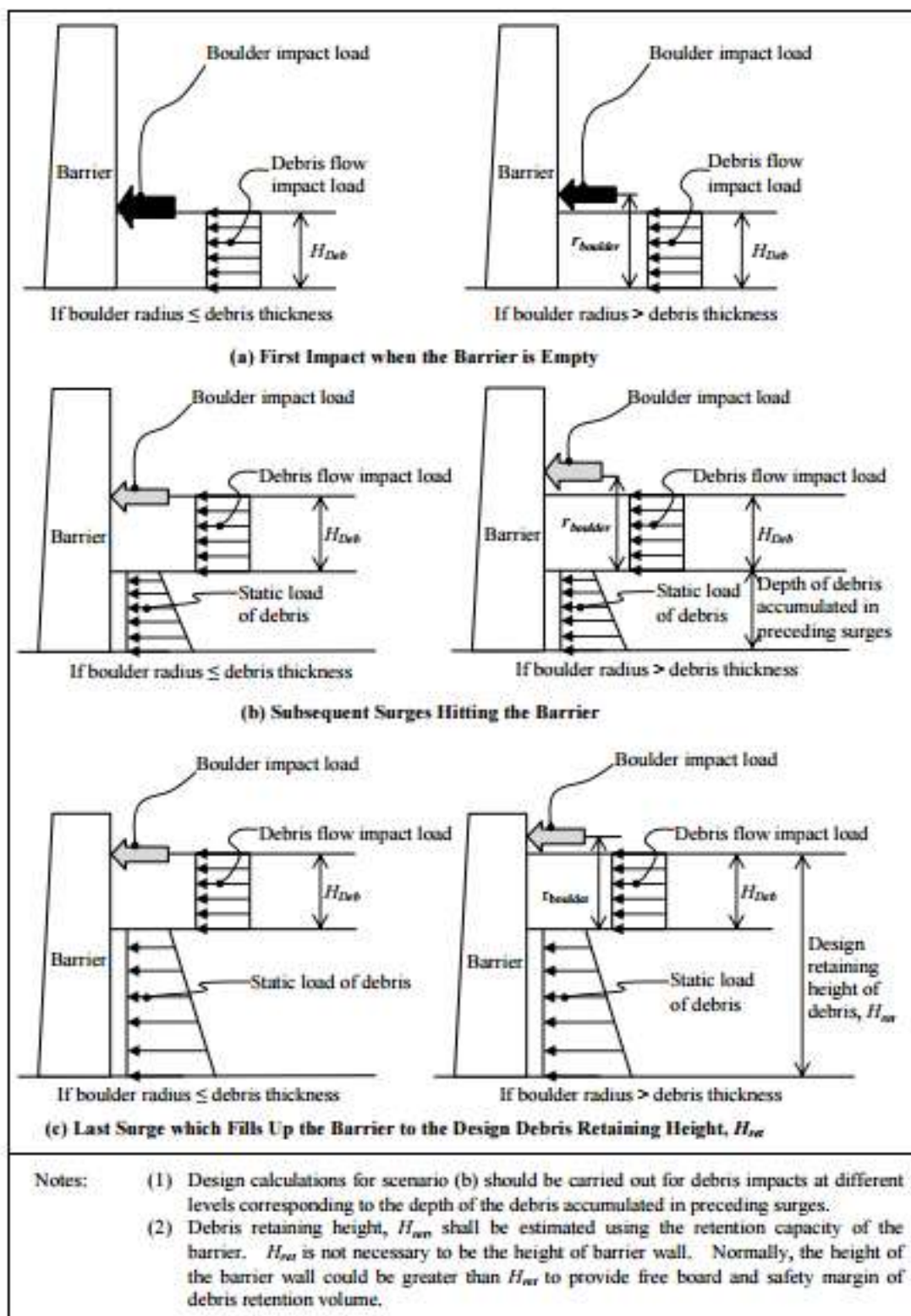


Figura 3.12. Cenários de dimensionamento – Múltiplos impactos dos detritos (KWAN, 2012).

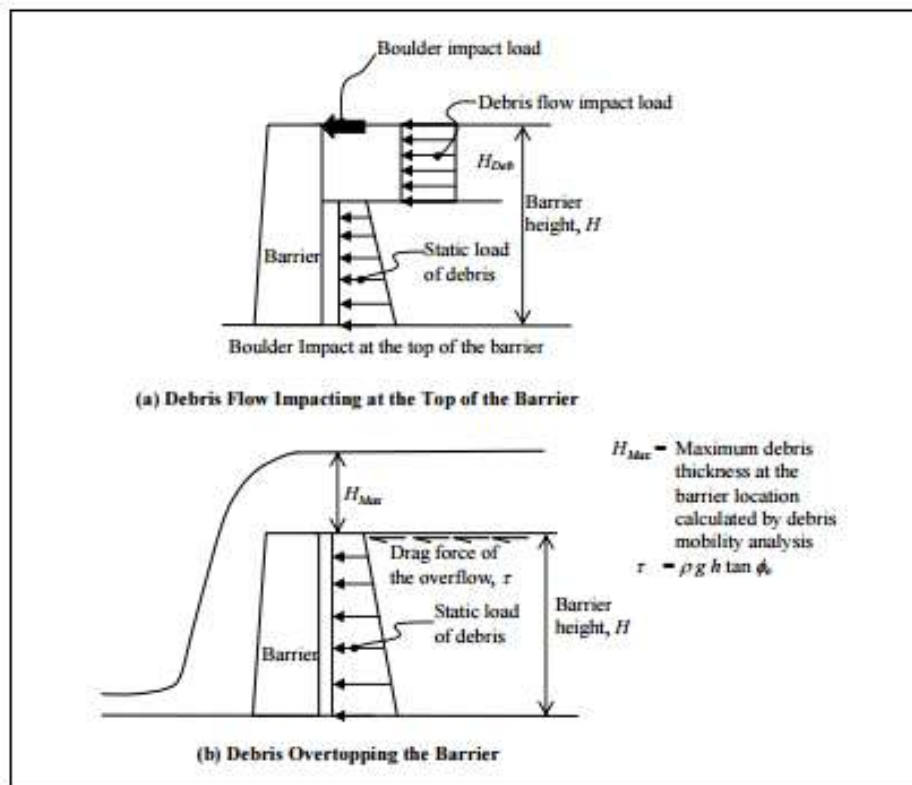


Figura 3.13. Cenários de dimensionamento – Impacto de queda de bloco e galgamento da barreira (KWAN, 2012).

3.4. CONSIDERAÇÕES DO USO DOS MODELOS DE FORÇA DE IMPACTO

SUWA & OKUDA (1983) reportam que os impactos dos blocos de rocha são duas ou três vezes maiores que a pressão dinâmica da lama do fluxo de detritos e acreditam que este é principal impacto a ser considerado e aquele que pode danificar uma estrutura.

Outros autores como HE et al. (2016) afirmam que a força de impacto deve ser dividida em três partes: a pressão dinâmica da lama do fluxo de detritos, a força de impacto dos agregados grosseiros e a força de impacto dos blocos de rocha. Porém, ARMANINI (1997) acredita que devido à velocidade mais reduzida dos blocos de grandes dimensões, o efeito também tem menor importância quando comparado às pressões hidrodinâmicas.

Devido à dificuldade da seleção dos diferentes modelos de carregamento existentes na literatura para projeto da estrutura de proteção, HUBL et al. (2009) sugerem que:

- i. Modelos devem ser convergentes. Ao incrementar a qualidade dos dados de entrada, a qualidade do modelo deve aumentar;

- ii. Pequenas alterações nos dados de entrada também produzem pequenas mudanças nos resultados;
- iii. Modelos não devem ter erros sistemáticos;
- iv. Dados de entrada devem ser medidos ou calculados;
- v. Modelo deve ser prático e de uso fácil;
- vi. Modelo deve ter alguma base teórica;
- vii. Modelo deve ser escolhido de acordo com os eventos históricos do lugar;
- viii. Entre modelos com mesma a acurácia, deve-se escolher aquele com menor número de dados de entrada.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo dos modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos analisados na presente pesquisa.

Finalmente, o autor desta dissertação acredita que os modelos hidráulicos definem melhor a força de impacto dos fluxos de detritos.

Os modelos de forças de impacto cujos parâmetros de entrada são muito difíceis de obter, visto que são medidos durante a ocorrência de fluxos de detritos, têm aplicação muito restrita e resultados geralmente menos representativos dos eventos reais.

Além disso, acredita-se também que quanto maior é a quantidade de parâmetros de entrada dos diferentes modelos de força de impacto, maior é a susceptibilidade ao erro. Um exemplo desse modelo é o de HE et al. (2016), que divide a força de impacto em forças de impacto de pedregulho, lama e blocos.

Entidades de pesquisas de diferentes países têm estabelecido abordagens para estimar as forças de impacto dos fluxos de detritos e a influência dos blocos. Por exemplo, a guia suíça de estruturas de proteção contra fluxos de detritos recomenda o uso da velocidade para a análise das forças de impacto e considera um fator empírico de 2 (EGLI, 2005). A Tabela 3.6 apresenta as diferentes abordagens.

Tabela 3.5. Resumo dos diferentes modelos hidráulicos, hidrostáticos e hidrodinâmicos.

Autor	Modelos Hidraulicos	Formula	Factor Empirico	Observações
Lichtenhahn (1973)	Hidrostaticos	$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu}$	2,8 - 4,4	Primeiro modelo proposto assumindo que o material é água
Scotton & Deganutti (1997)	Hidrostaticos	$P_{m\acute{a}x} = k \cdot \rho_{Mu} \cdot g \cdot h_{Mu}$	2,5 - 7,5	Modelo reduzido onde valores promedios de k varia de 5,3 para fluxos mais viscosos e 3,5 para menos viscosos
Armanini & Scotton (1992)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = 9 \frac{1}{2} \rho_{Mu} h_0^2$	-	Modelo reduzido onde se observam dois tipos de impacto
Mizuyama (1979)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	1,0 - 2,0	Medições in situ no Japão
Watanabe & Ikeya (1981)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	2,0 - 4,0	Medições in situ no Japão de fluxo de lama
Wendeler (2007)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	0,7 - 2,0	Modelo reduzido
Bugnion (2011)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	0,4 - 2,0	Medições in situ
Du (1986)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	3	
Zhang (1990)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	3,0 - 5,0	Medições in situ
Vandine (1996)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	1	Depende del área da seção transversal
Hungr (1984)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2 \cdot \sin \beta$	1.5	Depende del área da seção transversal. Retroanalise de fluxos em British Columbia
Ishikawa (2008)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	1,0 - 1,8	Depende del área da seção transversal. Modelo reduzido
Canelli (2012)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot A \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	1,5 - 5,0	Depende del área da seção transversal. Modelo reduzido
Daido (1993)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = \alpha \cdot \rho_{Mu} \cdot h \cdot v^2$	5,0 - 12,0	
Hubl & Holzinger (2003)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = 5 \cdot \rho_{Mu} \cdot v^{0,8} \cdot (g \cdot h_{Mu})^{0,6}$	-	Modelo reduzido
Cui (2015)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = 5,3 Fr^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	-	Modelo reduzido e banco de dados de 155 registros de eventos desenvolveu uma regressão hidrodinamica
Hubl (2009)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = a Fr^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	a (4,9 - 5,2) b (-1,3;-1,66)	Modelo reduzido e regressesões não lineares com numero de Froude menor que 3
Zannutigh & Lamberti (2004)	Hidrodinamicos	$P_{m\acute{a}x} = Cc \frac{(1 + \sqrt{2} Fr)^2}{2} g \rho_{Mu} \cdot h^2$	-	Modelo reduzido considerando o numero de Froude e Cc como um fator empírico considerando a aceleração vertical
Armanini (2011)	Hidrodinamicos	$F^- = \left\{ 1 + \frac{Fr^2}{2} \right\} \left\{ 1 + \frac{\psi Fr^2}{1 + 0.5 Fr^2} \right\}$		Considera a força como adimensional e em função do numero de Froude.
He (2016)	Hidrodinamicos	$P_f = \rho_f v_f^2$ $P_g = 0,964 E^{0,4} \rho_s^{0,6} v_s^{1,2} \varphi$		Considera que a força de impacto é a somatoria entre o impacto dos matacões, lama e pedregulhos. (Pf =força da lama, Pg=força do pedregulho)

Tabela 3.6. Propostas de estimativa da pressão dinâmica de detritos (Adap. KWAN, 2012).

Grupo de pesquisa	Pressão dinâmica detritos (p)	Abordagem de cenários de dimensionamento e impacto de matacões
GEO Report No.104 (Lo, 2000)	$p = \gamma \rho v^2 ; \gamma=3$	A carga de dimensionamento considera a superposição da pressão dinâmica dos detritos e o impacto do matacão, calculado com a equação Hertz modificada por um factor de redução de 0.1
Austria (ASI, 2008)	$p = 4.5 \rho v^{0.8} (gh)^{0.6}$	A carga de dimensionamento considera a superposição da pressão dinâmica dos detritos e o impacto do matacão, calculado com a equação Hertz.
British Columbia Canada (VanDine, 1996)	$p = \gamma \rho v^2 ; \gamma=1$	Cenários de dimensionamentos não são mencionados. O impacto do matacão é calculado usando equação de Hertz e modificadas por Hungr (1984)
China (MLR, 2006)	$p = \gamma \rho v^2 ;$ $\gamma=1$ estruturas circulares $\gamma=1.33$ estruturas retangulares $\gamma=1.47$ estruturas quadradas	Cenários de dimensionamentos não são mencionados. O impacto do matacão é calculado usando equações flexão-rigidez
Japan (NILIM, 2007)	$p = \gamma \rho v^2 ; \gamma=1$	Cenários de dimensionamentos não são mencionados. O impacto do matacão é calculado usando equações modificadas da Hertz com fator redução de 0.1
Taiwan (SWCB, 2005)	$p = \gamma \rho v^2 ; \gamma=1$	O impacto do matacão e a pressão dinâmica de detritos são considerados separadamente nos cenários de dimensionamento. O impacto do matacão é calculado usando equações modificadas da Hertz com fator redução desde 0.2 até 0.5

3.6. ALTERNATIVA DE ABORDAGEM AO MÉTODO DA FORÇA (MÉTODO DA ENERGIA)

A energia cinética do impacto de blocos e fluxo de detritos é dissipada com a absorção da energia pelo sistema da barreira com seus elementos.

As barreiras dinâmicas podem ser dimensionadas considerando o estado limite último ou também chamado de estado MEL (*Maximum Energy Level*) e o estado de energia de serviço ou estado SEL (*Service Energy Level*). O estado MEL utiliza a capacidade máxima da barreira, o que significa maiores custos, porém uma manutenção reduzida. Em contraparte o estado SEL não considera a capacidade máxima da barreira, mas exige manutenção frequente.

A abordagem tradicional do método da energia é relacionada à energia cinética do movimento, portanto:

$$E = \frac{1}{2} M v^2 \quad \text{Eq. 3.29}$$

Onde M é a massa efetiva do fluxo de detritos e v é a velocidade do fluxo.

WENDERLER et al. (2008) inserem o conceito de massa efetiva e estabelecem que a massa varia entre 10 000 e 20 000kg, pois depende da vazão do fluxo e é expressa por:

$$M = \rho Q T \quad \text{Eq. 3.30}$$

Onde:

ρ = Densidade do fluxo (kg/m³);

Q = Vazão pico (m³/s);

T = Duração de impacto do fluxo.

A duração de impacto do fluxo varia de 1 até 4 segundos para o caso de fluxo de detritos e de 0,2 até 0,5 segundos no caso de queda de blocos; embora outros autores reportem valores de até 12 segundos. Por outro lado, a vazão de pico dos fluxos de detritos depende do volume do material que potencialmente pode ser retido na barreira e é determinada por (MIZUYAMA et al., 1992):

$$Q = 0,135 V_{DF}^{0,78} \quad \text{Eq. 3.31}$$

Onde V_{DF} é o volume do fluxo de detritos, que pode variar entre 100m³ e 1000m³. A vazão de pico pode variar de 5m³/s até 30m³/s.

LUIZ-FONSECA et al. (2011) apresentam uma relação baseada na premissa de que a energia deve ser transformada em força de impacto e, portanto, por meio da segunda lei de Newton, recomendam que a força de impacto seja determinada por:

$$F_{imp} = M \cdot a \quad \text{Eq. 3.32}$$

E a aceleração do movimento é dada por:

$$a = \frac{v^2}{D} \quad \text{Eq. 3.33}$$

Onde D é a máxima deflexão da barreira, cujo valor pode variar entre 2 até 7m, em função do tipo de barreira e fabricante.

Com as Equações 3.32 e 3.33, a força de impacto em termos da inércia cinética é dada por:

$$F_{imp} = 2 \frac{E}{D} \quad \text{Eq. 3.34}$$

Importante comentar que observações in situ de fluxos de detritos na Suíça mostraram que a abordagem da energia apresenta limitações na modelagem do fluxo de detritos, sendo uma delas a não consideração dos efeitos da força de arraste quando o fluxo galga a barreira.

MÉTODOS NUMÉRICOS DE FLUXOS DE DETRITOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os métodos numéricos podem oferecer uma melhor representação dos eventos reais de fluxos de detritos, quando comparados aos resultados das relações empíricas e dos métodos analíticos. Os métodos analíticos e numéricos são baseados em mecanismos que envolvem análises probabilísticas do material, enquanto os métodos empíricos são baseados em correlações de dados obtidos de eventos ocorridos.

Os fluxos de detritos são movimentos de massa muito complexos. Portanto, a análise com relações empíricas requer uma quantidade razoável de informações de campo que muitas vezes são difíceis de obter, além de ser geralmente acompanhada de dispersão dos resultados. Segundo McDOUGALL (2006), os métodos empíricos estimam valores de pico e não fornecem informações sobre a distribuição espacial dos parâmetros estudados. No entanto, são métodos simples cujo nível de confiança varia com a qualidade e acurácia com as quais os dados são coletados nas diferentes topografias e geologias.

Os métodos analíticos utilizam a analogia do bloco deslizando por equilíbrio limite e modelam o movimento de massa fazendo uso das leis da física, da dinâmica dos sólidos e dos fluidos (MORLES, 2009).

Os métodos numéricos de fluxo de detritos conseguem modelar numericamente situações reais e investigar o comportamento do evento, além de oferecer resultados próximos à realidade. Esses métodos são baseados nas leis constitutivas e na força gravitacional que, associadas aos modelos reológicos, representam o comportamento e propriedades do fluxo.

MC DOUGALL (2006) afirma que a modelagem dinâmica dos meios contínuos é mais precisa porque a geometria e o mecanismo são levados em conta explicitamente. Associa-se a isto o fato da modelagem considerar equações de conservação de massa, momento e energia da mecânica dos fluidos. Esses modelos podem ser classificados em: i) modelos de topografia 2D versus 3D; ii) modelos com enfoque euleriano versus lagrangiano e iii)

modelos que requerem parâmetros medidos versus modelos que utilizam parâmetros calibrados.

Na abordagem euleriana o marco de referência se encontra fixado no espaço, e as soluções das equações são mais complexas. Na abordagem lagrangeana, o marco de referência se movimenta com a velocidade local, o que produz uma simplificação das equações governantes; porém, estas são susceptíveis a distorções devido a grandes deformações.

Não existem ensaios padronizados para avaliar algumas propriedades. Portanto, a abordagem dos parâmetros medidos pode ser considerada idealista. Além disso, o processo de calibração dos parâmetros pode consumir muito tempo e requerer bases de dados e informação de eventos anteriores (MCDOUGALL, 2006).

4.2. PROGRAMAS DISPONÍVEIS NO MERCADO

Nos últimos 40 anos têm sido desenvolvidos programas numéricos para análises de fluxos de detritos, visando uma melhor compreensão do fenômeno destes fluxos ou avalanches, e contribuir com os métodos de prevenção e mitigação de eventos reais.

Esses programas são baseados na dinâmica dos meios contínuos. LANG et al. (1979) apresentaram a primeira proposta com a modificação de um modelo euleriano em 2D para incluir a resistência de atrito.

A Tabela 4.1 resume alguns dos programas numéricos existentes com sua reologia e a metodologia de cálculo.

HUNGR (1995) desenvolveu o programa DAN-W, bi dimensional, que utiliza uma solução unidimensional lagrangeana para as equações de movimento e considera as características das tensões internas, do arrastre e as diversas reologias.

O programa DAN3D desenvolvido por MCDOUGALL (2006) é uma atualização do programa DAN-W e utiliza uma formulação langrangeana em 3D, incorporando o método numérico de SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*).

Pesquisas anteriores, desenvolvidas por VALVERDE (2016), usaram o programa DAN3D e DAN-W com reologia de Voellmy para retroanalisar os fluxos de detritos. Na presente pesquisa são usados o programa DAN-W e Rocfall com a reologia de atrito.

Tabela 4.1. Principais programas numéricos para análises de fluxos de detritos (Adapt. Luna, 2012).

Programa	Reologia	Método	Varição da Reologia
MADFLOW	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (com malha)	Não
KANAKO	Atrito	Lagrange	Não
DAN-W	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (sem malha)	Sim
DAN3D	Atrito, Voellmy, Bingham, Newtoniano e Plástico	Lagrange (sem malha)	Sim
RAMMS	Voellmy	Euler	Sim
FLATMODEL	Atrito e Voellmy	Euler	Não
SCIDDICA s3-hex	Baseado em Energia	Euler	Não
3dDMM	Atrito e Voellmy	Euler	Sim
PASTOR Model	Atrito, Voellmy e Bingham	Lagrange (sem malha)	Sim
MassMov2D	Voellmy e Bingham	Euler	Sim
RASH3D	Atrito, Voellmy e Quadrático	Euler	Não
FLO-2D	Quadrático	Euler	Não
TITAN2D	Atrito	Lagrange (sem malha)	Não
VolcFlow	Atrito e Voellmy	Euler	Não

Os programas DAN-W e DAN3D não fornecem energia de impacto, parâmetro importante para o dimensionamento de estruturas de contenção. Além disto, eles consideram o movimento como um fluxo equivalente, que corresponde a uma severa restrição para obtenção da energia de impacto de fluxo de detritos. Esta limitação acarretou a decisão de se realizar também análises com o programa Rocfall.

O programa Rocfall, desenvolvido pela *Rocscience*, é um programa de análise estatístico-probabilística para queda de blocos. Devido a isto, ele foi selecionado para as análises complementares nesta pesquisa, tendo em vista que fluxos de detritos também são formados por grandes blocos de rocha.

4.3. CARACTERÍSTICAS DO DAN3D E DAN-W

O DAN3D e o DAN-W foram desenvolvidos para simular movimentos de massa reais por meio de um modelo langrageano bidimensional para a solução das equações de fluxo ao longo de um modelo de elevação digital. O programa DAN3D representa uma evolução do programa bi dimensional DAN-W, e foi desenvolvido por MC DOUGALL (2006).

O programa DAN-W é baseado na teoria de Savage – Huntter, na qual o comportamento da massa segue o modelo constitutivo de atrito e se deforma plasticamente segundo a teoria de Rankine. Além disso, o DAN-W estabelece uma compatibilidade entre as tensões internas e as tensões no fundo do canal do fluxo. Esse programa consegue simular eventos ocorridos por meio de retroanálises e estimar o comportamento de futuros movimentos de massas.

O DAN3D e o DAN-W consideram características importantes como a complexidade da reologia, a heterogeneidade, a rigidez interna e a capacidade de incluir o material arrastado pelo fluxo de detritos ao longo do trajeto. Os programas possuem uma abordagem semi-empírica, baseada no conceito do fluxo equivalente, onde a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas (HUNGR, 1995).

A abordagem é chamada de semi-empírica porque requer uma calibração de eventos anteriores e utiliza diferentes soluções analíticas para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. A Figura 4.1 apresenta um exemplo da abordagem do fluxo equivalente aplicado a uma avalanche de rochas.

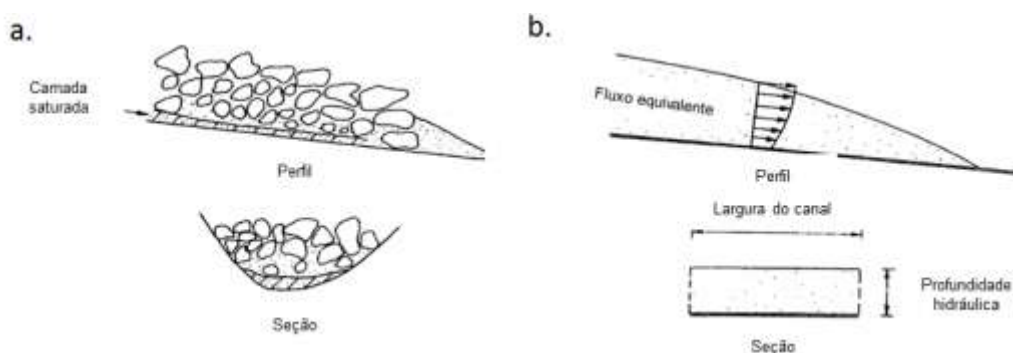


Figura 4.1. Diagrama da abordagem do fluxo equivalente (Mod. HUNGR, 1995).

O material em movimento e o material da base podem ser governados por reologias diferentes, portanto, HUNGR & MCDOUGALL (2009) consideram que a reologia interna é de atrito e é controlada pelo ângulo de atrito. No entanto, é interessante lembrar que a reologia basal é uma combinação das reologias de atrito, turbulenta e viscosa.

Outro fator importante referente à reologia da base e seus parâmetros associados corresponde ao fato de estes não podem ser estimados em laboratório nem considerados como aparentes, pois são selecionados baseados na calibração empírica por meio de retronálise de movimentos de massa.

PELIZONI (2014), pesquisadora brasileira pioneira no emprego do programa para fluxos de detritos, destaca algumas características do DAN3D:

- i. Simula fluxos complexos em superfícies em 3D;
- ii. Permite uma distribuição dos esforços não hidroestáticos e anisotrópicos;
- iii. Simula a erosão do material;
- iv. Permite a escolha de diferentes modelos reológicos (atrito, Voellmy, Bingham, inelástico e Newtoniano);
- v. Processa a modelagem sem malha de elementos, eliminando os problemas relativos à distorção durante grandes deslocamentos.

4.4. EQUAÇÕES GOVERNANTES DO DAN-W E DAN3D

O programa DAN-W considera a continuidade do modelo através de um sistema de blocos deformáveis de volume fixo, interpolando a partir de funções de suavização (*smoothing functions*).

Por outro lado, o método numérico do programa DAN3D é o SPH (*smooth particle hydrodynamics*), que corresponde a um método sem malha, baseado em formulações lagrangeanas e que divide o volume total em partículas distribuídas em colunas de referência, as quais podem incrementar seu volume devido ao arraste provocado pelo fluxo de detritos.

O volume total da massa deslizada é dividido em elementos conhecidos como partículas regularizadas, onde cada partícula tem um volume finito e que só pode ser aumentado conforme o arraste da massa deslizada, esquematizado na Figura 4.2 (HUNGR & MCDOUGALL, 2009).

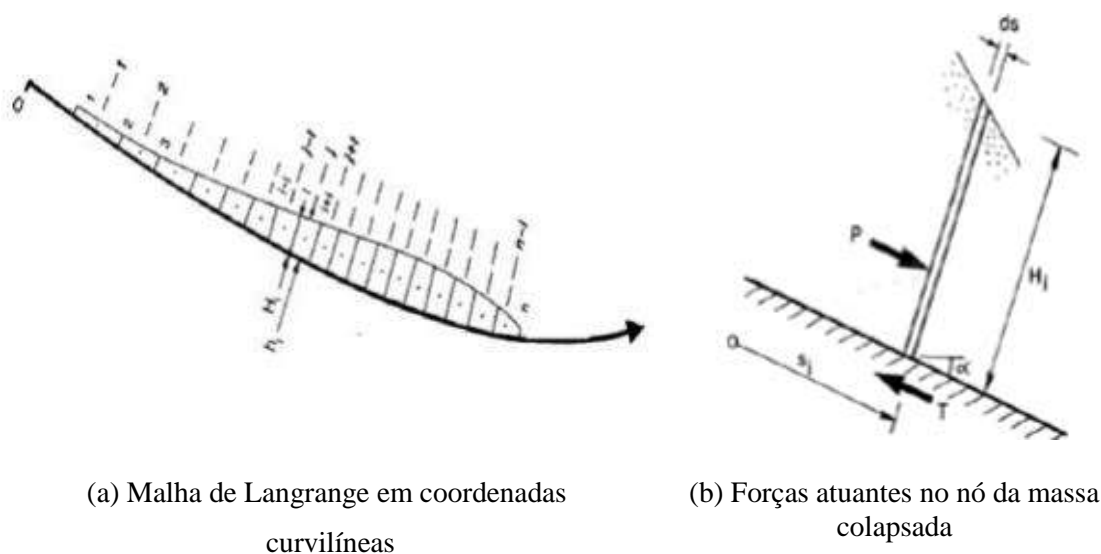


Figura 4.2. Método numérico Lagrangeano baseado em SPH (HUNGR, 1995).

O método usado permite a simulação do movimento em uma topografia real em 3D, evitando problemas de distorção das malhas de elementos e restrições associadas às grandes deformações (XAVIER SILVA, 2015). Os cálculos são feitos no centro das partículas e a distribuição é dada pela função de Gauss, conforme esquematizado na Figura 4.3.

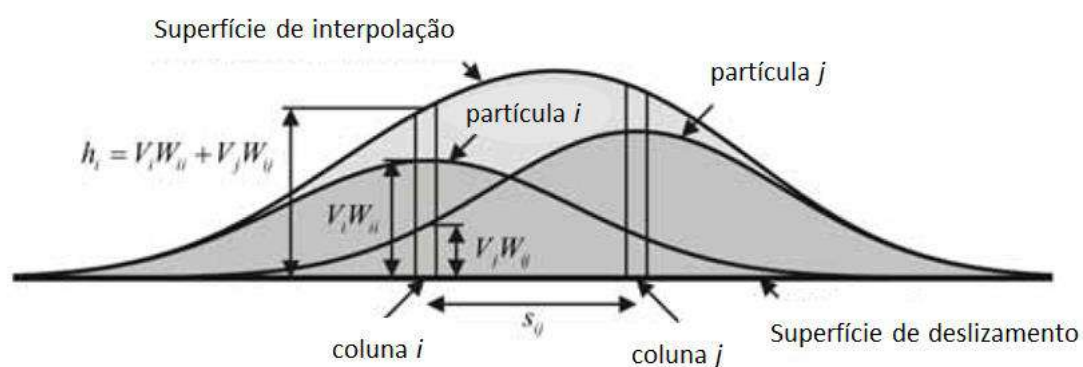


Figura 4.3. Interpretação do SPH em um marco de profundidade média (Mod. MCDOUGALL, 2006).

As equações de balanço de momento são baseadas nas equações de profundidade média de Saint-Venant e de águas rasas para a coluna de referência. Considerando o equilíbrio dinâmico nas direções x e y, tem-se:

$$\rho h \frac{Dv_x}{Dt} = \rho h g_x - k_x \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_{zx} - \rho v_x E \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$\rho h \frac{Dv_y}{Dt} = \rho h g_y - k_y \sigma_z \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xy} \sigma_z \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde, os termos à esquerda da equação são acelerações locais da coluna de referência. Os termos à direita das equações são: i) primeiro termo: componente da força da gravidade; ii) segundo e terceiro termo: relacionados com as pressões; iii) quarto termo: só aparece na direção x (direção do fluxo) e corresponde à resistência ao cisalhamento na base e o arraste gerado pelo movimento.

O programa DAN3D considera as colunas de referência como distribuídas ao longo da massa em movimento. O material erodido é considerado por meio da taxa de erosão estabelecida como dado de entrada. Por sua vez, o programa DAN-W estabelece que as colunas de referência representam blocos com um volume fixo.

4.4.1. Reologia dos materiais

O programa DAN3D considera quatro modelos constitutivos para representar o comportamento do material, a saber, plástico, atrito, Voellmy e Bingham. Por outro lado, o programa DAN-W considera oito modelos constitutivos: plástico, newtoniano, turbulento, atrito, atrito Coulomb, lei da força, Voellmy e Bingham. Os mais usados são apresentados em detalhes.

Modelo Plástico

No modelo plástico, o fluxo é controlado pela resistência ao cisalhamento constante, da mesma forma que o estado estacionário de resistência não drenada, c , em materiais liquefeitos, podendo ser expressa por:

$$T = c \cdot A_i \quad \text{Eq. 4.3}$$

Onde A_i é a área do elemento infinitesimal do método SPH.

Modelo de Atrito

O esforço de cisalhamento é proporcional à tensão efetiva normal ao esforço na base da camada σ'_z , e expresso por:

$$\tau_{zx} = -\sigma' \cdot \tan \varphi \quad \text{Eq. 4.4}$$

Onde φ é o ângulo de atrito dinâmico da base.

As poropressões em estabilidades de taludes podem ser relacionadas com a tensão total pela razão $r_u = \frac{u}{\sigma_z}$, a qual poder ser substituída na Equação 4.4:

$$\tau_{zx} = -\sigma \cdot (1 - r_u) \cdot \tan \varphi \quad \text{Eq. 4.5}$$

Podendo ainda ser simplificada para incluir somente variáveis dependentes, introduzindo o termo de ângulo de atrito basal (φ_b):

$$\tau_{xz} = -\sigma_z \cdot \tan \varphi_b \quad \text{Eq. 4.6}$$

Ao se adotar o coeficiente de poropressão ou ângulo de atrito residual, assume-se que os carregamentos se situam entres os carregamentos drenado e não drenado, conforme apresentado na Figura 4.4 (MC DOUGALL, 2006).

O modelo de atrito usa os seguintes parâmetros de entrada: peso específico (kN/m^3), ângulo de atrito (graus), coeficiente de poropressão (r_u), ângulo de atrito interno (graus) e profundidade máxima de erosão (m). Os modelos governados por atrito possuem velocidades maiores e uma frente de depósitos menor quando comparados aos outros modelos.

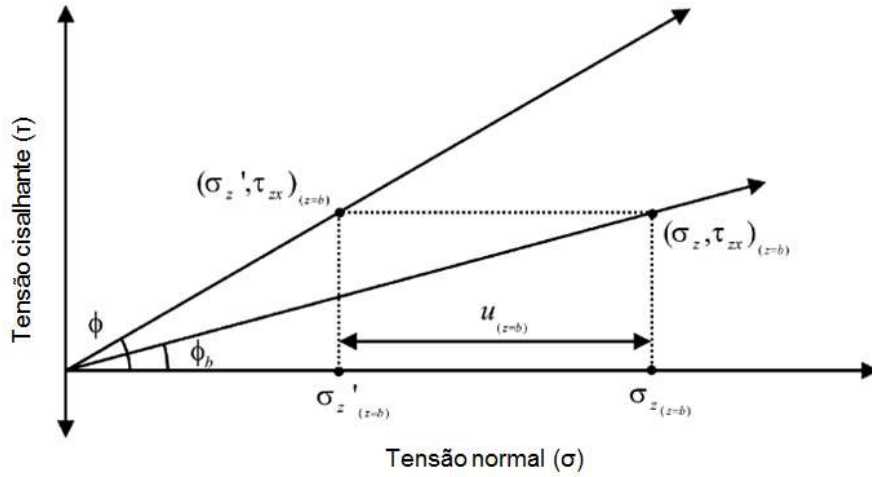


Figura 4.4. Relação entre os parâmetros utilizados no modelo de atrito (MC DOUGALL, 2006).

Modelo de Voellmy

Também é chamado de modelo turbulento, devido à combinação dos comportamentos turbulento e de atrito, sendo a resistência calculada por:

$$\tau_{zx} = - \left(\sigma_z \cdot f + \frac{\rho \cdot g \cdot v_x^2}{\xi} \right) \quad \text{Eq. 4.7}$$

Onde f é o coeficiente de atrito e ξ é o parâmetro de turbulência.

O primeiro termo da equação considera as componentes de atrito da resistência e tem a mesma forma da expressão utilizada no modelo de atrito, sendo o parâmetro f análogo ao parâmetro $\tan \varphi_b$. O segundo termo, introduzido por VOELLMY (1955), é utilizado nos programas para considerar qualquer possível dependência da resistência com a velocidade.

Esta reologia tem sido muito estudada e utilizada por diversos pesquisadores para modelar vários movimentos de massa como avalanches de neve, avalanches de rochas, fluxos de

detritos e avalanches de detritos (KÖRNER, 1976; PERLA et al., 1980; RICKENMANN & KOCH, 1997; HUNGR et al., 2002; REVELLINO et al., 2004).

Modelo Bingham

O modelo de Bingham também é chamado de modelo viscoso, pois combina os comportamentos plástico e viscoso. Um fluido com estas características do modelo se comporta como um material rígido abaixo do limite de elasticidade (ou escoamento) e acima do limite viscoso. A resistência ao cisalhamento é função da profundidade do fluxo, velocidade, tensão de escoamento e da viscosidade, sendo expressa por:

$$\tau_{zx}^3 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{yield}}{2} + \frac{\mu_{Bingham} \cdot v_x}{h} \right) \cdot \tau_z^2 - \frac{\tau_{yield}^3}{2} = 0 \quad \text{Eq. 4.8}$$

Onde τ_{yield} é a tensão de escoamento Bingham e $\mu_{Bingham}$ é a viscosidade de Bingham.

4.4.2. Dados de entrada dos programas

Os dados de entrada (*input*) do programa DAN –W são divididos em parâmetros de controle, topografia e materiais. O número de materiais, número de elementos e fator de forma de acordo com a seção transversal do canal são considerados nos parâmetros de controle. A topografia engloba o perfil de elevação-distância e a largura do canal. Os parâmetros de materiais consideram a reologia e suas propriedades.

Os dados de saída (*output*) no programa DAN-W são disponibilizados em um relatório que especifica o número de elementos, intervalo de tempo utilizado, tempo transcorrido desde o início da corrida, tipo de configuração, fator de forma inserido, volume final, área de deposição e distância percorrida. Esse programa fornece a opção de colocar pontos de controle ao longo da trajetória simulada do evento para analisar as velocidades da frente, máxima e traseira do fluxo, assim como a altura do fluxo ao longo do movimento.

No caso do DAN3D, os dados de entrada (*input*) do programa são divididos em parâmetros de controle, parâmetros relacionados com a reologia adotada e com a geomorfologia da área estudada. Os parâmetros de saída (*output*) são correspondentes à velocidade do movimento, volume final da massa envolvida, espessura da camada

erodida, ângulo de viagem e distância total percorrida. Além disso, são gerados conjuntos de isocurvas contendo o resultado das principais variáveis em cada um dos intervalos de tempo durante a modelagem com seus respectivos valores máximos.

4.5. CARACTERÍSTICAS DO ROCFALL

O programa Rocfall desenvolvido pela *Rocscience* é um programa de análise estatístico-probabilística de queda de blocos em encostas. Fornece envoltórias de energia e de velocidade para toda a trajetória da queda de blocos, assim como a localização dos pontos finais de parada do movimento. Permite a inserção de barreiras rígidas e flexíveis e analisa seu desempenho em relação à energia cinética de impacto, para assim determinar o tamanho, capacidade e localização da barreira.

O programa considera o bloco como uma massa pontual e os diferentes tipos de movimentos, tais como deslizamento, rolamento, tombamento, queda livre e trajetória parabólica. Esses movimentos são calculados usando as leis do movimento e as leis referentes às colisões de partículas.

A reprodução analítica da trajetória do movimento de queda de blocos de rocha é muito difícil, porque o movimento associa diversos fatores que devem ser cuidadosamente determinados, tais como as propriedades dos blocos, as condições iniciais do movimento e as propriedades dos materiais das encostas.

4.5.1. Diferentes tipos de movimentos

Como já mencionado, existem diferentes tipos de movimentos do bloco durante a sua trajetória, sendo classificados em deslizamento, rolamento, tombamento, queda livre e trajetória parabólica.

O deslizamento é produzido quando a trajetória do bloco é paralela à superfície e o bloco não sofre rotação. O coeficiente de atrito da superfície de deslizamento mobiliza um esforço contra o movimento do bloco.

O rolamento é definido como um movimento acelerado, cuja trajetória é paralela à superfície e não existe deslizamento entre o bloco e a superfície. Já no caso da

movimentação por tombamento ocorre quando existe uma diferença brusca na inclinação da superfície, e podem ser usadas as equações da conservação de energia para o movimento circular.

O movimento de queda livre é definido como um movimento acelerado vertical de velocidade inicial nula, onde a única força atuante sobre o bloco é devida à aceleração da gravidade. Por outro lado, o movimento parabólico do bloco ocorre sob a ação da aceleração da gravidade, mas com velocidade inicial não nula.

O movimento de bloco relacionado com as colisões na superfície é baseado nos coeficientes de restituição normal e tangencial para a determinação da quantidade de energia dissipada durante a colisão.

4.5.2. Dados de entrada e de saída do Rocfall

Os dados de entrada do programa (*input*) são divididos em condições iniciais, materiais e topografia. As condições iniciais são representadas pela velocidade inicial, massa e quantidade de blocos.

As características dos materiais são o grupo mais complexo dos dados de entrada e correspondem à rugosidade da encosta, ângulo de atrito e os coeficientes de restituição normal e tangencial, com seus respectivos desvios normais. Segundo STEVENS (1998), os coeficientes de restituição são os mais importantes e difíceis de serem obtidos, pois eles representam a energia dissipada durante os choques dos blocos com a superfície da encosta e podem variar de 0 (choque totalmente inelástico) a 1 (choque totalmente elástico).

A topografia ou geometria da seção de cálculo deve ser a mais próxima da realidade, baseada em levantamentos topográficos, visto que as trajetórias dos blocos de rocha são sensíveis a pequenas mudanças na geometria (STEVENS, 1998).

Os parâmetros de saída (*output*) do Rocfall são representados por: velocidade, altura e energia cinética da queda de bloco e do impacto na barreira caso existente. Esses parâmetros são apresentados por meio de envoltórias e podem ser exportados para processadores como planilhas de cálculo Excel.

CAPÍTULO 5

CASOS DE ESTUDO

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os fluxos de detritos são movimentos de massas catastróficos, com elevados danos materiais e econômicos. No Brasil, vários eventos de fluxos de detritos têm sido registrados, sendo a maioria dos eventos deflagrados pelas intensas chuvas. O primeiro registro de fluxo de detritos é o de Serra das Araras em 1967 no estado do Rio de Janeiro, seguido no mesmo ano pelo de Caraguatatuba em São Paulo.

A Região Serrana do estado do Rio de Janeiro possui características geológicas, geomorfológicas, uso ocupacional do solo e elevados índices pluviométricos, o que contribui para a alta susceptibilidade de ocorrência de movimentos de massas.

Os movimentos de massa estudados neste trabalho de pesquisa correspondem aos ocorridos no Morro Das Pedras em Nova Friburgo, com dois fluxos de detritos: Hospital São Lucas e Córrego D´Antas. O Município de Nova Friburgo no estado do Rio de Janeiro apresenta os maiores índices pluviométricos do estado, com uma média anual de 2500mm nas áreas mais altas.

Também são estudados nesta pesquisa dois ensaios de campo instrumentados de fluxos de detritos, realizados em *Pieve di Alpago* na Itália e em *Veltheim* na Suíça. Estes ensaios de fluxos de detritos em verdadeira grandeza foram realizados em condições controladas, visando o maior conhecimento da altura do fluxo, velocidade e esforços de impacto em estruturas de proteção.

5.2. FLUXOS DE DETRITOS MORRO DUAS PEDRAS

5.2.1. Agente Deflagrador

No mês de janeiro de 2011, ocorreu a catástrofe da Região Serrana Fluminense, na área da Serra dos Órgãos. Fortes chuvas deflagraram movimentos de massa, resultando em

uma tragédia de grandes proporções. Segundo MOTTA (2014), o evento foi provocado pela entrada de massas de ar da Zona de Convergência do Atlântico Sul, resultando em temporais de 297mm acumulados de chuvas na noite do dia 11 para o dia 12 de janeiro de 2011, já tendo sido precedidas por um alto índice pluviométrico, de 388mm, no mês de dezembro de 2010, conforme apresentado na Figura 5.1.

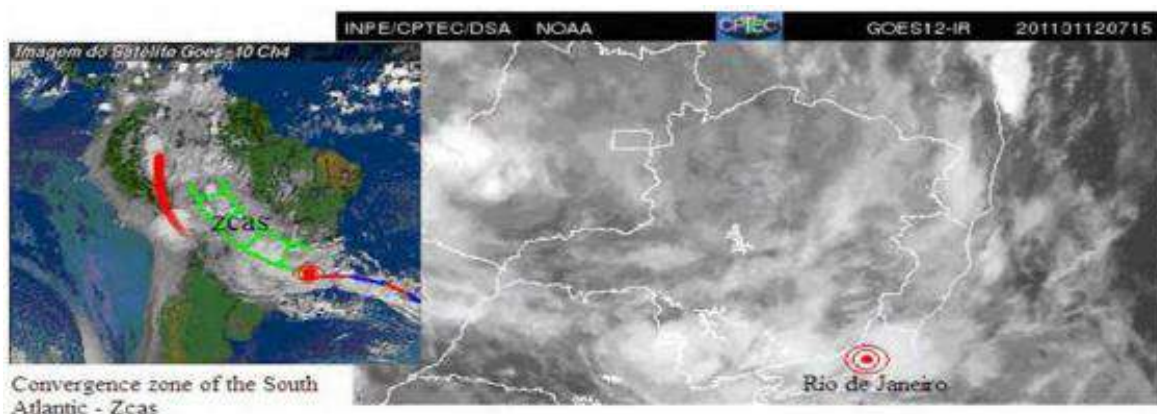


Figura 5.1. Zona de Convergência do Atlântico Sul. Situação Climática no evento de 2011 (BAGGIO & HORN, 2011).

5.2.2. Localização

O Morro Duas Pedras foi o cenário de ocorrência de dois fluxos de detritos de grandes proporções: Fluxo de detritos Hospital São Lucas e Fluxo de detritos Córrego D'Antas.

O fluxo de detritos Hospital São Lucas foi assim denominado devido a sua proximidade do Hospital São Lucas, centro de atendimento de pacientes cardíacos da região serrana. O fluxo de detritos ocorreu no morro Duas Pedras, no bairro com o mesmo nome, na cidade de Nova Friburgo. A área de estudo foi definida entre as coordenadas UTM 752540 e 753900 Leste e, 7535500 e 7537200 Norte.

O fluxo de detritos do Córrego D'Antas teve seu nome atribuído em função do nome do bairro para o qual ele se dirigiu. A área de estudo corresponde à parte alta da encosta do Morro Duas Pedras, e foi definida entre as coordenadas UTM 752540 e 753900 Leste e, 7535500 e 7537200 Norte.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam as imagens de satélite antes e depois do fluxo de detritos no Morro Das Pedras. Conforme o relatório técnico da empresa GEOMECANICA S.A (2011) e as imagens de satélite, identifica-se que a massa deslocada teve sua origem no topo da encosta, especificamente em uma zona de fratura de alívio.



Figura 5.2. Imagem de Satélite da área antes do evento no Morro Das Pedras, capturada em 2010 (GOOGLE EARTH, 2016).



Figura 5.3. Imagem de Satélite da área depois do evento no Morro Das Pedras, capturada em 2011 (GOOGLE EARTH, 2016).

A zona de iniciação dos movimentos se localiza na área compreendida entre o ponto mais alto, cota 1300m, e o ponto na cota 1278m, aproximadamente a 22m da cota de início.

A massa deslocada se movimentou do ponto de origem, no topo da encosta até encaixar no talvegue, para dar início à zona de transporte e erosão. A partir deste ponto, parte da massa mobilizada se dirigiu no sentido da localidade de Córrego D'Antas e a outra parte se movimentou no sentido do Hospital São Lucas, situado na vertente oposta. As trajetórias dos dois movimentos iniciados são apresentadas na Figura 5.3.

Estima-se que aproximadamente 500m³ de material contendo solo e blocos de rocha tenham sido inicialmente mobilizados e dado origem ao movimento, que foi agregando mais massa ao se encaixar no talvegue.

5.2.3. Geologia

O Morro Das Pedras é formado por rochas graníticas do Proterozóico pertencentes a Suíte Serra dos Órgãos. A face norte da escarpa rochosa possui em média 45° de inclinação com a cota máxima atingindo aproximadamente 1360m de altitude com cerca de 480m de altura (PORTELLA et al., 2013).

Na Figura 5.4, observam-se duas famílias de fraturas subverticais, mergulhando para o sudoeste segundo a direção 238°/75° e para o nordeste segundo a direção 320°/80°, persistentes em todo o maciço.

Foram observadas surgência de água por entre as juntas e fraturas, e essas podem ter facilitado o deslocamento de grandes volumes de rocha, que deram início ao movimento (GEOMECANICA, 2011).

O morro Das Pedras possui um depósito de tálus que se estende desde a base da escarpa até a rodovia RJ-130 com mais de 10,0m de espessura. Há inúmeras ocorrências de blocos, de dimensões variadas, misturados na matriz do solo e blocos soltos sobre o terreno.

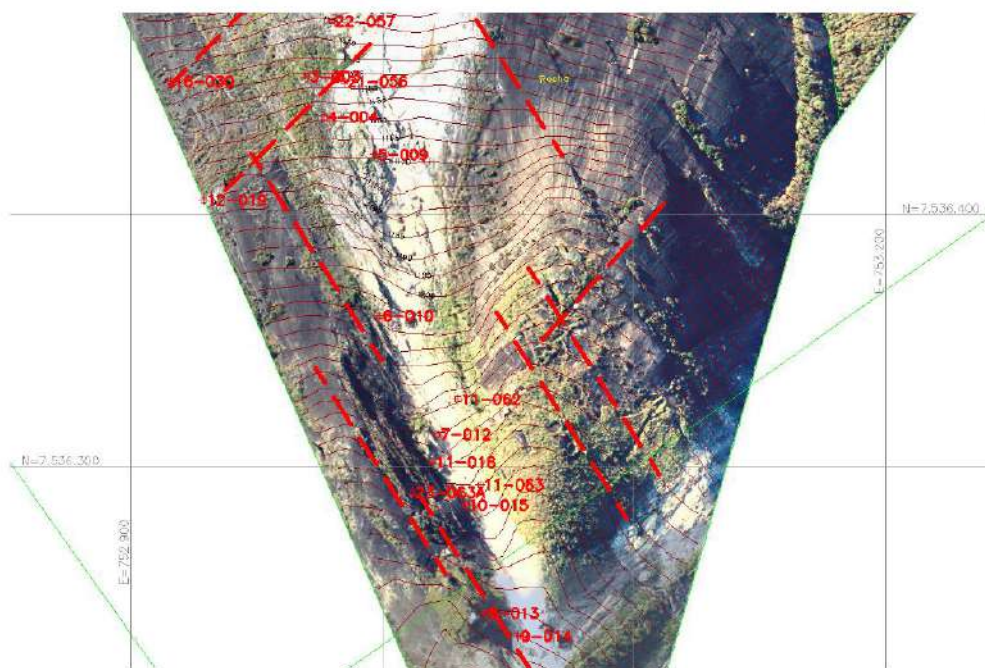


Figura 5.4. Fraturas subverticais do maciço destacadas na ortofoto (GEOMECANICA, 2011).

5.2.4. Características dos fluxos de detritos do Morro Das Pedras

Hospital São Lucas

O morro Das Pedras sofreu vários movimentos de massa, um deles iniciou-se como um escorregamento do tipo translacional, transformando-se em fluxo de detritos que atingiu o Hospital São Lucas localizado na zona leste do Morro. A Figura 5.5 mostra o início do fluxo de detritos do Hospital São Lucas, aproximadamente na cota 1310m e no contato solo/rocha.

O fluxo de detritos que atingiu o Hospital São Lucas foi acompanhado de outro paralelo como pode ser observado na Figura 5.6. Esta figura também indica as três zonas bem definidas do fluxo de detritos. A zona de iniciação do evento do Hospital São Lucas possui uma extensão de 25m com uma declividade média da encosta de 40°. O movimento começou pela mobilização de vários blocos, que misturados com solo, desceram pela escarpa rochosa sem uma canalização definida (avalanche de detritos) até atingir o talvegue no meio da encosta, transformando-se em um fluxo de detritos.



Figura 5.5. Origem do fluxo de detritos Hospital São Lucas na cota 1300m. (GEOMECANICA, 2011).



Figura 5.6. Zonas de iniciação, transporte e deposição do fluxo de detritos Hospital São Lucas.

A escarpa rochosa na zona de transporte possui uma declividade aproximada de 33° com uma extensão de 425m e corresponde à parte intermediária do morro. Nesta zona o material atingiu o tálus depositado no canal e erodiu severamente o canal.

O fluxo de detritos perde velocidade na zona de deposição e a inclinação da encosta encontra-se reduzida a 18° . O material é depositado nesta zona, na área do Hospital São Lucas. A Figura 5.7 mostra diversos blocos de rochas de grandes volumes depositados nesta zona.



Figura 5.7. Blocos de rocha de grandes proporções na zona de deposição.

Estima-se que a massa mobilizada inicial foi de 1000m^3 descendo pela escarpa rochosa. O material atingiu o talvegue e erodiu o canal resultando em um volume final de aproximadamente 12.000m^3 .

A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação até o ponto mais distante atingido pelo depósito dos detritos. Inicialmente, o material se movimentou pela escarpa rochosa até atingir o talvegue por uma distância total de 830m.

A velocidade do fluxo de detrito não foi registrada, mas as testemunhas reportaram a elevada rapidez do movimento.

A área planimétrica do depósito foi estimada em função das imagens aéreas antes e após o evento, obtendo-se assim uma área de 25.000m^2 (VALVERDE, 2016).

Córrego D'Antas

O fluxo de detritos do Córrego D'Antas iniciou na vertente norte, no topo do maciço, no contato solo/rocha, conforme a Figura 5.8, e prosseguiu orientado por uma linha de fraturas, erodindo a camada de solo residual e expondo o topo rochoso alterado (PORTELLA et al., 2013).



Figura 5.8. Trajetória do fluxo de detritos Córrego D'Antas originada na cota 1300m (GEOMECANICA, 2011).

Esse fluxo de detritos teve três canais principais e um quarto canal de fluxo na lateral direita a jusante da encosta, chamados nesta pesquisa de Canal 1, Canal 2, Canal 3 e Canal 4. Conforme apresenta a Figura 5.9, o material desse movimento de massa se juntou ao depositado pelo movimento principal, aumentando a distância atingida. A maior parte do fluxo de detritos se movimentou pelos canais 2 e 3, concentrando o maior volume e destruindo casas do setor. Por outro lado, o Canal 1 possui trechos íngremes com volume de material menos significativo.

Na zona de transporte, a escarpa rochosa tem uma declividade variável de 40 a 60°, enquanto na zona de deposição, a topografia se suaviza com uma inclinação aproximada de 26°. A trajetória de deposição do material atingiu uma distância de aproximadamente 500m. Alguns blocos de grande volume tiveram pequenos deslocamentos e foram

depositados no talvegue da zona de transporte. Em contrapartida, outros blocos foram arrastados até a zona de deposição do movimento.

Estima-se que cerca de 1.000m^3 de material contendo solo e blocos de rocha tenham sido inicialmente mobilizados, originando o movimento que foi agregando mais massa ao se encaixar no talvegue. Um volume final entre 7.000m^3 e 16.000m^3 foi estimado por MOTTA (2014), baseando-se em relações empíricas.

A distância percorrida pelo movimento foi medida desde a zona de iniciação até o ponto mais distante, atingido pelo depósito de detritos. Este evento teve 3 canais, e o canal mais extenso teve uma massa deslocada de 800m aproximadamente.

A área plana de deposição foi estimada por PELIZONI (2014) e MOTTA (2014) e corresponde a 35.000m^2 e 31.000m^2 , respectivamente. Segundo os relatos dos sobreviventes da tragédia, a velocidade do fluxo foi muito elevada, porém ninguém conseguiu medi-la.

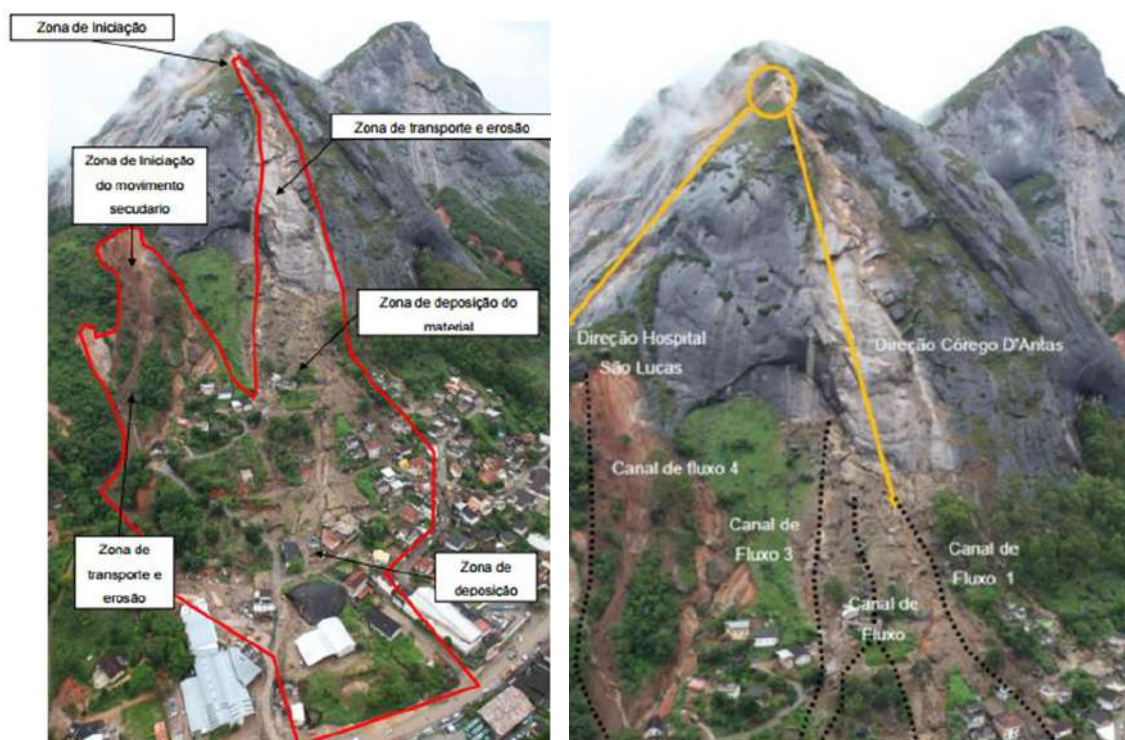


Figura 5.9. Movimento de massa do Córrego D'Antas (PELIZONI, 2014).

5.3. RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS FLUXOS DE DETRITOS MORRO DUAS PEDRAS

Depois da catástrofe de 2011 na Região Serrana, o grupo de pesquisa da COPPE-UFRJ / PUC-RIO, dirigido pelos professores Anna Laura Nunes e Alberto Sayão, tem pesquisado os diversos movimentos de massas que ocorreram naquela data, com várias dissertações de mestrados e teses de doutorado.

Pesquisadores como MOTTA (2014), PELIZONI (2014), XAVIER SILVA (2015), TEIXEIRA SILVA (2016) e VALVERDE (2016) têm estudado o fluxo de detritos do Córrego D'Antas. Atualmente o grupo conta com um banco de dados de eventos ocorridos e eventos simulados numericamente com programas computacionais (DAN-W, DAN3D), dados de levantamentos in situ e análises usando equações empíricas. A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos de campo e de simulações numéricas realizadas pelos diversos pesquisadores.

Tabela 5.1. Dados e Resultados obtidos das simulações do Fluxo de Detritos Córrego Dantas.

Parâmetro	Observada	Pelizone	Valverde	Silva
Área de deposição (m ²)	35600	20000	34650	19378
Volume Final (m ³)	17000	11000 - 15000	18000	13210
Distância Percorrida (m)	770 - 780	600-1000	770 - 790	621
Velocidade (m/s)	ND	12-15	2-10,5	17 máx
Erosão (m)	0,5-1	0,5-1	0,17 - 0,7	1

PELIZONI (2014) foi a primeira a investigar o fluxo de detritos do Córrego D'Antas usando o software DAN3D. XAVIER SILVA (2015) fez uma análise paramétrica dos valores de entrada que mais influenciam os resultados de saída do programa. PELIZONI (2014) e XAVIER SILVA (2015) usaram duas reologias, sendo elas de atrito e de Voellmy. Porém, VALVERDE (2016) usou uma única reologia ainda calibrou os dados de entrada por meio de um programa PEST, especialmente desenvolvido por MCDOUGALL (2016) para melhor definição de parâmetros de *debris flows*.

A compilação de resultados do fluxo de detritos Córrego D'Antas é importante para o desenvolvimento das análises da presente pesquisa, uma vez que este caso foi escolhido para a avaliação de modelos, relações empíricas e simulações numéricas de esforços de impacto.

Observa-se da Tabela 5.1, que os valores obtidos das simulações de VALVERDE (2016) são os mais similares aos valores reais do fluxo. Portanto, esses valores serão considerados para avaliar os diferentes modelos de força de impacto desta pesquisa. Com os mesmos dados de entrada de VALVERDE (2016), foram analisados diferentes parâmetros de saídas em diferentes pontos de controle e comparados àqueles obtidos pela autora.

Os valores de altura de fluxo fornecidos por VALVERDE (2016) são menores tendo em consideração que blocos de, aproximadamente, 5m^3 formaram parte do fluxo de detritos. Os modelos hidrostáticos e os mistos têm em consideração a altura do fluxo para calcular a pressão de impacto, por conseguinte, foi necessário realizar novas simulações considerando outra reologia que possivelmente influenciasse o resultado.

KWAN (2012) considera que as reologias de atrito e Voellmy são as mais adequadas para simular fluxos de detritos e as que fornecem resultados mais próximos da realidade. As pesquisas anteriores do Grupo *Debris Flow* consideraram somente a reologia de Voellmy. Desta forma, a presente pesquisa ampliou as análises numéricas considerando a reologia de atrito no programa DAN-W.

Conforme mencionado, VALVERDE (2016) dividiu os fluxos de detritos do morro Duas Pedras em Hospital São Lucas e Córrego D'Antas, sendo que este último se divide em duas zonas (Figura 5.10). Esta divisão visou atender a trajetória do fluxo de detritos que ocorreu em 3 canais preferenciais e 1 canal secundário. Estas condições foram também assumidas para as análises desta pesquisa.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as seções transversais críticas dos dois fluxos detritos, Hospital São Lucas e Córrego D'Antas (canal principal), respectivamente.

Finalmente, é preciso esclarecer que os programas DAN-W e DAN3D não conseguem quantificar a energia de impacto diretamente. Por esta razão, foi selecionado o programa Rocfall para avaliar a energia gerada pelo impacto da queda um bloco com grande dimensão, que simule o impacto do fluxo de detritos.

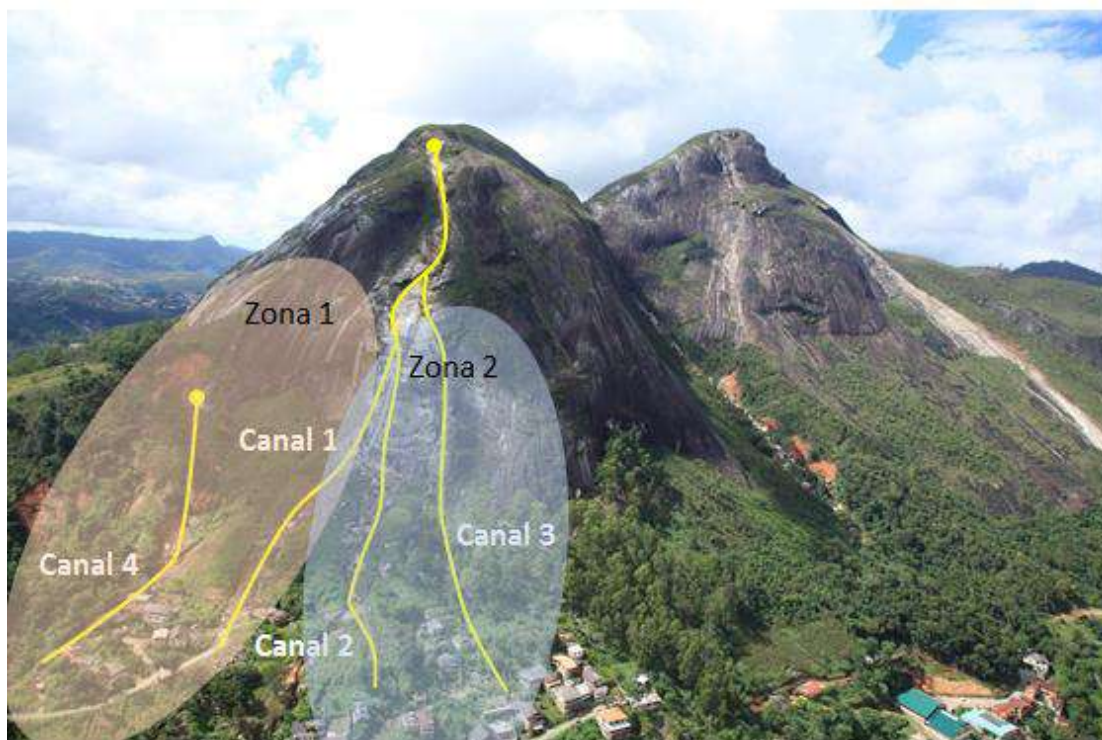


Figura 5.10. Fluxos de detritos de Córrego D'Antas divididos em duas zonas para a realização das modelagens (VALVERDE, 2016).

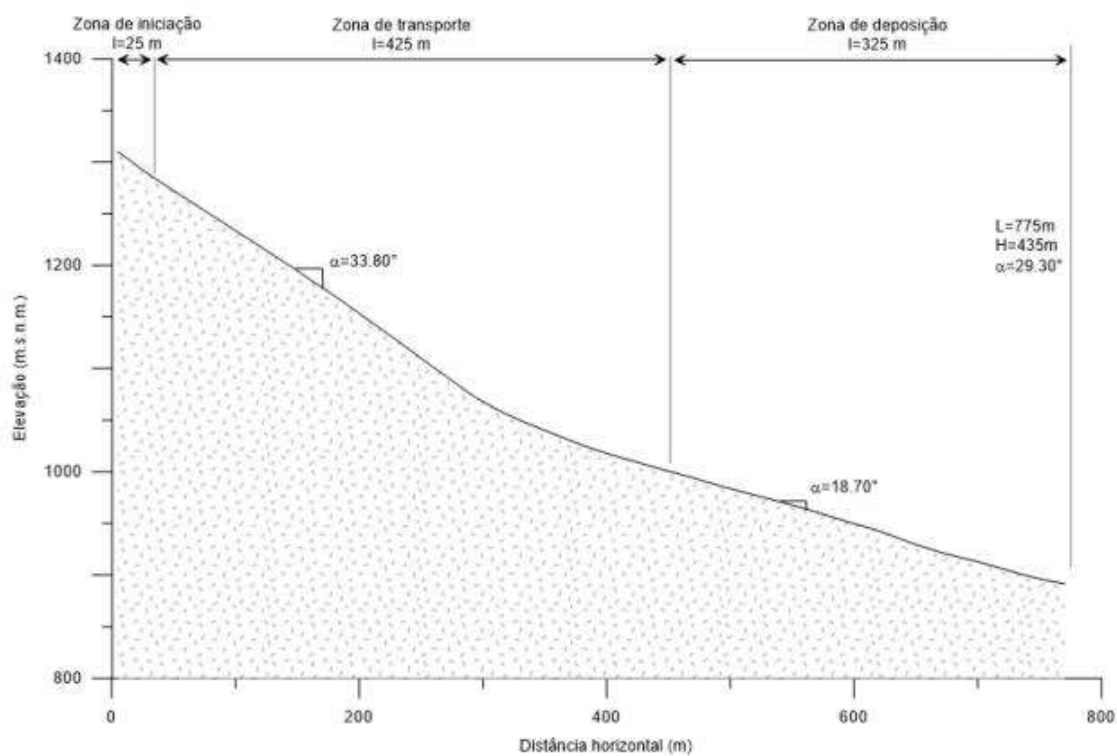


Figura 5.11. Seção transversal do fluxo de detritos Hospital São Lucas.

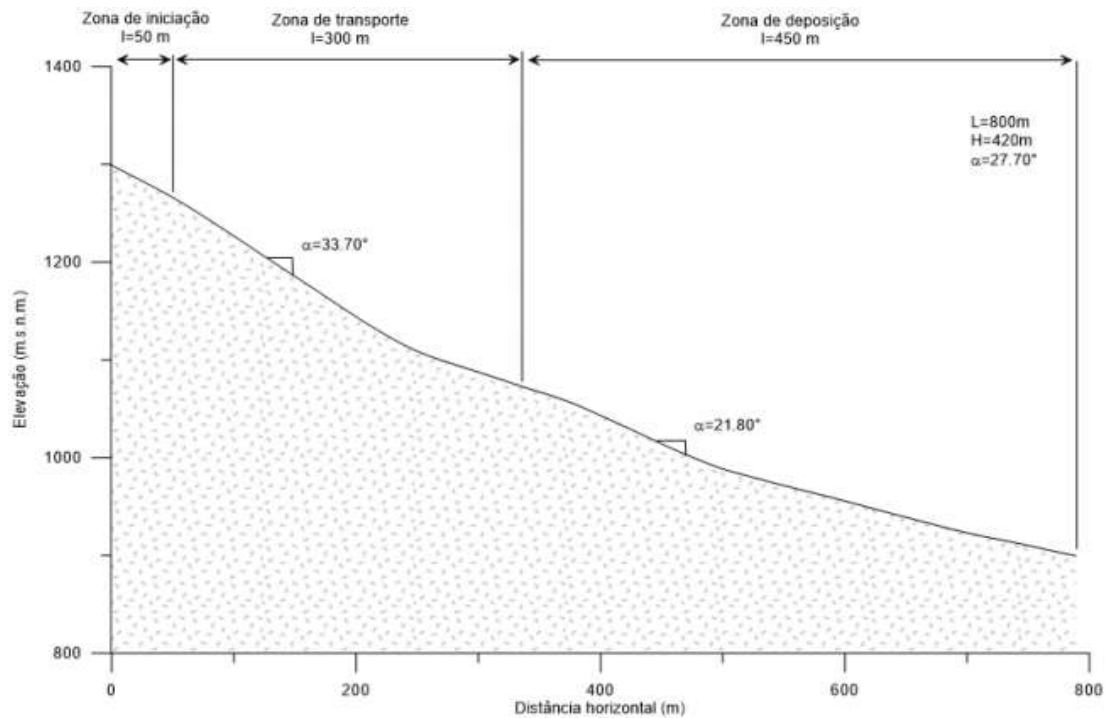


Figura 5.12. Seção transversal crítica do fluxo de detritos Córrego D'Antas.

5.4. FLUXOS DE DETRITOS INSTRUMENTADOS EM ENSAIOS DE CAMPO

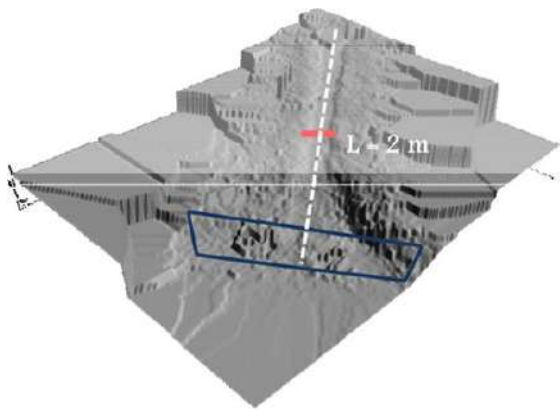
Apesar da complexidade dos fluxos de detritos, vários pesquisadores têm tentado reproduzir este tipo de movimento em laboratório e em campo, nas encostas naturais.

Dois grupos de pesquisa merecem destaque em função dos investimentos realizados em ensaios de campo para conhecer melhor as forças de impacto dos fluxos de detritos. Um grupo é liderado por Segalini na Itália e o outro é liderado por Wendeler na Suíça.

5.4.1. Fluxos de detritos em Pieve di Alpago – Itália

O grupo de pesquisa de Segalini da Universidade di Parma montou um campo experimental para o estudo de fluxos de detritos e impactos em barreiras flexíveis. A área de teste se localiza na cava Pieve di Alpago, próxima ao município de Belluno em Veneto, Itália.

A área de teste foi preparada em encosta com canal natural de forma trapezoidal de 40° de inclinação, 40,0m de comprimento e 2,0m de largura. Uma barreira flexível de 3000kJoules com 6,0m de altura e 20,0m de comprimento foi instalada na extremidade do canal próxima à área de deposição. A Figura 5.13 mostra o mapa digital de elevação da área de teste e vista geral da área de testes.



(a) Mapa digital do terreno



(b) Vista geral

Figura 5.13. Área de ensaios de fluxos de detritos de Pieve di Alpago (Disponibilizada por MACCAFERRI).

O canal preparado não apresenta material passível de erosão, pois é assente em superfície rochosa sem finos e/ou fragmentos, com ângulo de atrito de 30°

Os ensaios de fluxo de detritos foram realizados considerando uma mistura de sólidos e água com massa específica de 1790 kg/m³. O volume total lançado na cota superior do canal foi de 500 m³ aproximadamente. Os diversos lançamentos foram realizados com volume de aproximadamente 40 m³ por lançamento. A Figura 5.14 apresenta a área antes e depois de ensaios de fluxo de detritos.



(a) Antes do ensaio



(b) Depois do ensaio

Figura 5.14. Ensaio de fluxo de detritos em Pieve di Alpago (Disponibilizada por MACCAFERRI).

A barreira flexível foi instrumentada com células de carga e sensores de deslocamento e a área de teste foi monitorada por câmeras especiais para a medição de parâmetros tais como altura do fluxo, velocidade e força de impacto. A Figura 5.15 apresenta a disposição das principais células de carga e a Tabela 5.2 resume os valores médios registrados pelas células de carga na campanha de ensaios. A célula de carga número 21 registrou valores muito baixos devido possivelmente ao efeito de restrição com o topo do canal. As células 15 e 20 apresentam valores maiores, pois o impacto do fluxo de detritos ocorre nessa região.

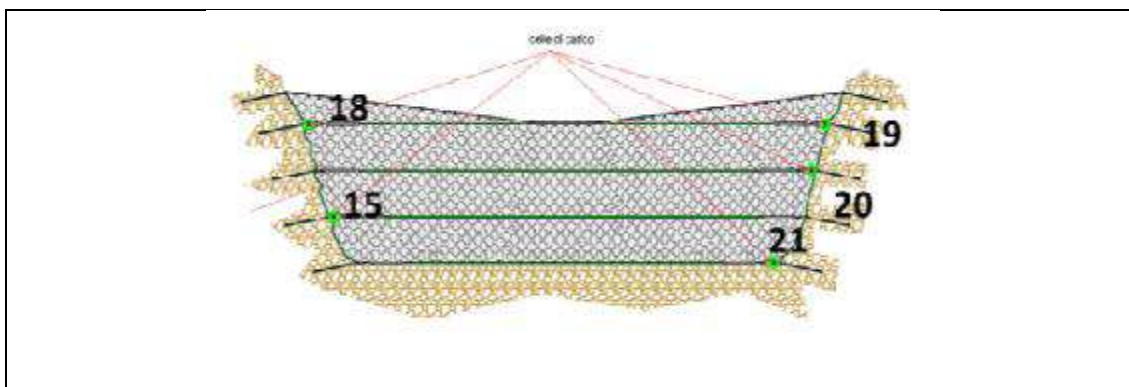


Figura 5.15. Esquema da barreira flexível instrumentada com células de carga (SEGALINI et al., 2016).

Tabela 5.2. Forças registradas pelas células de carga da barreira flexível.

Célula de Carga	Forças (kN)	
	F máxima	F média
15	254,7	179,98
18	114,4	53,09
19	105,7	40,98
20	366,1	183,68
21	40,8	31,20

5.4.2. Fluxos de detritos em Veltheim – Suíça

O grupo de pesquisadores de Wenderler e Bugnion decidiu criar seu teste de campo na região de Veltheim, Canton Aargau na Suíça. Eles instrumentaram a barreira flexível com células de carga e o canal com câmeras e lasers para medir a velocidade e altura do fluxo de detrito em diversos pontos do canal semi natural. A Figura 5.16 ilustra a área de testes de Veltheim.

A encosta natural da área de testes foi preparada por meio de escavação do canal de fluxo com 40,0m de comprimento e 8,0m de largura e inclinação de 30°. Foram realizados 12 lançamentos com diferentes misturas e configurações em volumes de 60 m³, os quais foram agrupados em 4 categorias de lançamentos. Foram realizados registros ao longo do

canal com sensores de deslocamento e lasers para medir velocidades e altura de fluxos em 3 pontos de controle (Figura 5.17).

A barreira flexível instalada ao final do canal também foi instrumentada com células de carga de diferentes tamanhos para medir o impacto do fluxo de detritos. Os resultados apresentados nas pesquisas do fluxo de detritos de Veltheim apresentam valores muito diferentes entre si e são resumidos na TABELA 5.3.

Tabela 5.3. Velocidades e pressões registradas pelas células de carga da barreira flexível.

Lançamento	Velocidade célula de carga maior (m/s)	Velocidade célula de carga menor (m/s)	Pressão célula de carga maior (kPa)	Pressão célula de carga menor (kPa)
4	2,2	2,3	17,2	18,4
5	6,8	8,6	61,5	92,9
6	-	10,8	-	106,1
7,1	-	8,6	-	112,5
7,2	-	6,1	-	75,2
8,1	7,2	9,3	41,7	72,9
8,28	6,5	8,1	28,1	86,2
9,1	8,3	9,3	65,9	135,6
9,2	5,2	5,5	48,7	96,3
9,3	5,7	8,3	44,6	146,3
10	9	8,9	96	201,1
11,1	7,9	-	94,6	-
11,2	8,9	-	83	-
13,1	9,5	8,9	98,5	138,8
13,2	10,5	-	123,7	-
14,1	9,4	-	138	-
14,2	9,3	-	132,5	-
14,3	8,1	-	99,7	-
14,4	11,9	-	108,2	-
15,1	10,1	-	109,4	-
15,2	9	-	99,7	-
16,1	6,9	-	69,2	-
16,2	13,6	-	177	-



Figura 5.16. Vista geral da área de testes de Veltheim (WENDELER, 2010).

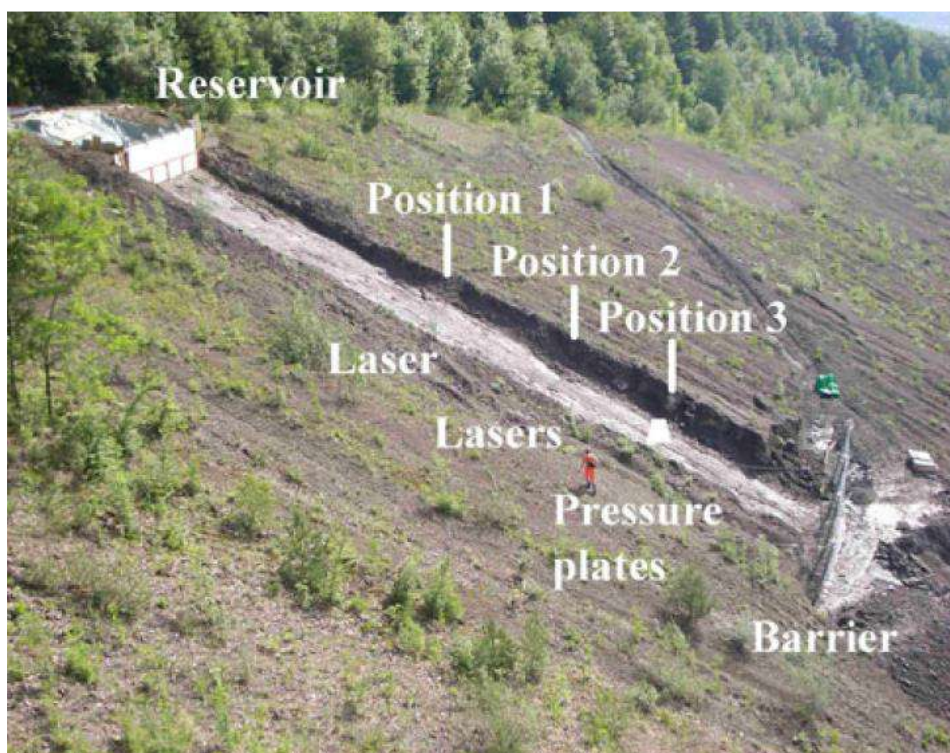


Figura 5.17. Canal do ensaio de campo com os pontos de localização da barreira e instrumentação (BUGNION et al., 2011).

CAPÍTULO 6

ANÁLISES

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os modelos de força de impacto de fluxo de detritos e queda de bloco são analisados neste capítulo, buscando avaliar a sua representatividade e consistência em relação aos casos de fluxos de detritos estudados. É sabido que também existe a abordagem tradicional pelo método da energia e também a modificada por WENDELER et al (2008). Portanto, esses resultados também são comparados.

Os ensaios em escala real de fluxos de detritos realizados no Pieve di Alpago e Veltheim são estudados e analisados numericamente com o programa DAN-W e os resultados são comparados aos valores obtidos em campo.

Neste capítulo também são apresentadas as análises numéricas com os programas DAN-W e Rocfall dos fluxos de detritos Córrego D'Antas e Hospital São Lucas, realizadas com objetivo de se avaliar os principais parâmetros dos fluxos de detritos assim obtidos e usá-los para determinação de forças e energias de impacto. Este estudo também possibilita a realização de retroanálises dos casos estudados e a obtenção de parâmetros básicos em função da reologia de atrito.

As análises desenvolvidas são muito diversas e em grande número, o que pode dificultar o acompanhamento deste capítulo. Desta forma, foi elaborado um fluxograma das análises e suas inter-relações, que facilitam as comparações de resultados, apresentado na Figura 6.1. Ressalte-se que o objetivo principal das análises reside na determinação dos esforços de impacto de fluxos de detritos, por meio de modelos analíticos, empíricos e numéricos. Análises complementares foram implementadas visando a estimativa de esforços e/ou verificação da representação dos modelos adotados. Esta pesquisa produziu muitas considerações e conclusões, porém neste documento são ressaltadas aquelas diretamente relacionadas aos esforços de impacto de fluxos de detritos.

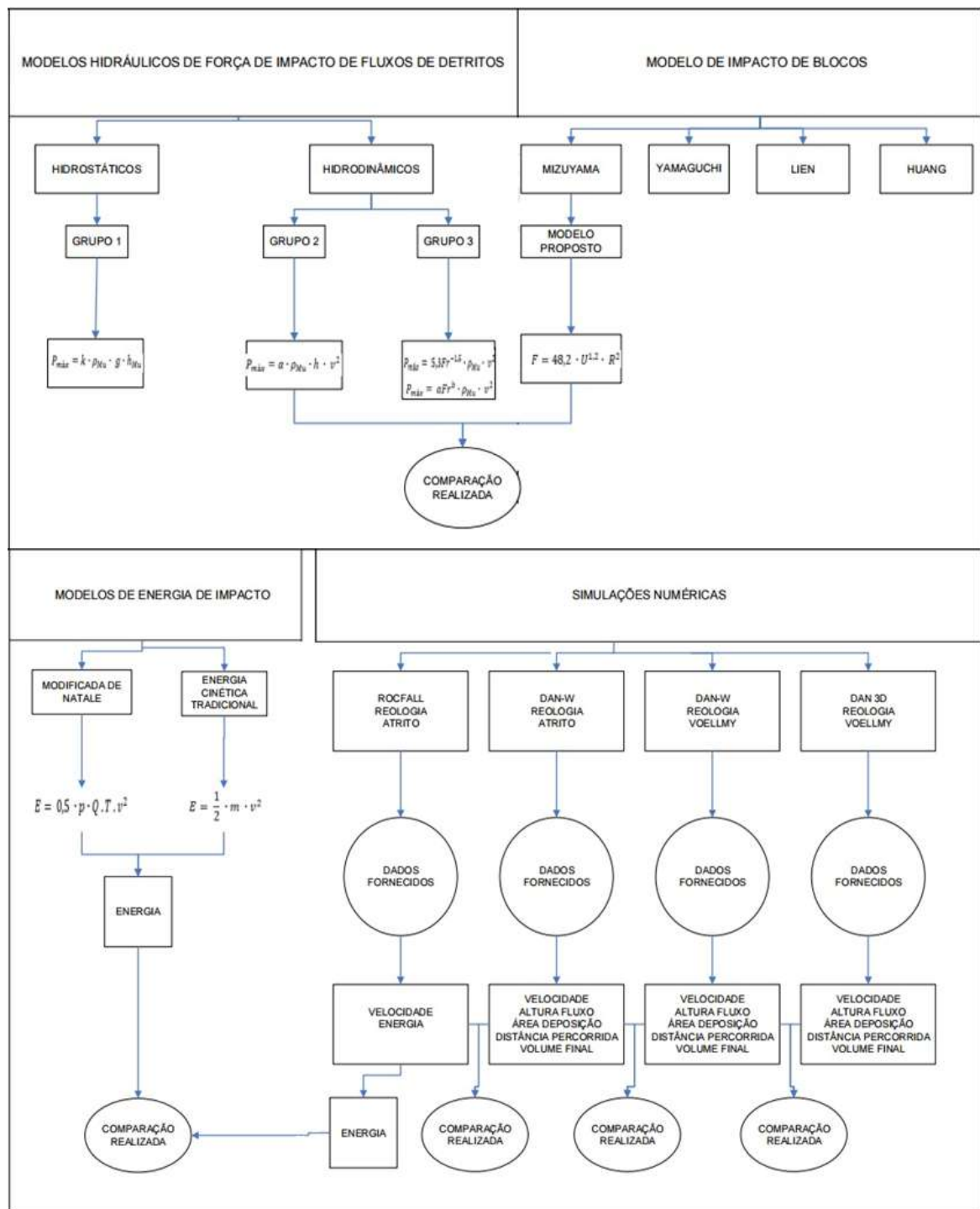


Figura 6.1. Fluxograma das análises e comparações realizadas na pesquisa.

6.2. ANÁLISES DE MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA

Nos capítulos anteriores foram mencionados os diferentes modelos e relações empíricas de força e energia de impacto. Devido à complexidade do fluxo de detritos, atualmente não existe um modelo ou uma relação que possam ser definidos como os mais adequados para a determinação dos esforços de impacto do movimento. Isto justifica a finalidade desta pesquisa em se estudar o assunto para contribuir no maior entendimento do tema e auxiliar a escolha de um método de força de impacto para o dimensionamento de estruturas de convivência e proteção para fluxos de detritos.

6.2.1. Análises de modelos de força de impacto de fluxos de detritos

No Capítulo 4 foram abordados os diversos modelos de força de impacto existentes na literatura, ressaltando que a grande maioria dos autores consideram que os modelos de força de impacto do tipo hidráulicos são os que fornecem resultados mais próximos da realidade.

Entretanto, os modelos hidráulicos apresentam uma divergência comum, a qual se torna um problema, representada pelo fator empírico que varia de autor para autor. Tanto os modelos hidrostáticos como os hidrodinâmicos possuem um fator empírico, cujo valor em função da proposta de cada autor.

Nos fluxos de detritos ocorridos no Brasil, a velocidade do movimento de massa foi elevada ocasionando grandes perdas. Acredita-se que, pelos comentários dos sobreviventes, os fluxos de detritos estudados nesta dissertação, no Morro duas Pedras, ocorreram com uma alta velocidade e com um único impacto, diferentemente da interpretação de vários autores que consideram vários pulsos de fluxos de detritos em um único evento.

Desta forma, fez-se necessária a elaboração de um modelo geomecânico do fluxo de detritos que representasse o evento real e com condições compatíveis com os modelos avaliados. Além disto, os modelos foram selecionados em função de suas características e de análises de resultados prévias, indicativas de boa representatividade dos casos reais.

Portanto, para a análise dos modelos de força de impacto foram consideradas as seguintes premissas:

- i. O ângulo de impacto do fluxo de detritos é assumido igual a 90°, isto é, a força de impacto é perpendicular à estrutura de proteção;
- ii. A estrutura de proteção foi assumida genérica, sem restrição relativa à área de impacto e, assim sendo, os esforços foram determinados em função da pressão com resultados expressos em unidade de pressão (KPa).

Os modelos selecionados para a realização das análises são divididos em 3 grupos, a saber (Figura 6.2):

- i. Grupo 1 composto pelos modelos hidrostáticos de LICHTENHAHN (1973), SCOTTON & DEGANUTTI (1997) e ARMANINI & SCOTTON (1992);
- ii. Grupo 2 composto pelos modelos hidrodinâmicos de WATANABE & IKEYA (1981), ZHANG (1990), WENDELER (2007), BUGNION (2011), DU (1986), MIZUYAMA (1979), HUNGR (1984), ISHIKAWA (2008), CANELLI (2012) e VANDINE (1996);
- iii. Grupos 3 composto pelos modelos hidrodinâmicos com Número de Froude, representados por HUBL (2009), HUBL & HOLZINGER (2003) e CUI (2015).

Modelos hidrostáticos	Modelos hidrodinâmicos	
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Lichtenhahn	Watanabe & Ikeya	Hubl
Scotton & Deganutti	Zhang	Hubl & Holzinger
Armanini & Scotton	Wendeler	Cui
	Bugnion	
	Du	
	Mizuyama	
	Hungr	
	Ishikawa	
	Canelli	
	Vandine	

Figura 6.2. Classificação dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos sem e com Número de Froude.

As análises dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos com fatores empíricos foram realizadas considerando o cálculo das pressões de impacto para fatores mínimo, médio e

máximo. A Tabela 6.1 resume os valores dos fatores empíricos adotados para os grupos 1 e 2. Importante ressaltar que o grupo 3 leva em consideração o número de Froude.

Tabela 6.1. Valores dos fatores empíricos de impacto adotados para os modelos hidrostáticos (Grupo 1) e hidrodinâmicos (Grupo 2).

	Grupo 1	Grupo 2
Mínimo	2,5	1
Médio	4,3	2,2
Máxima	7,5	5

As análises foram realizadas com valores de velocidade e altura do fluxo de detritos apresentados na Tabela 6.2, determinados com o programa DAN3D por VALVERDE (2016). Importante ressaltar que os valores mais importantes a serem analisados correspondem aos valores na zona de deposição, visto que qualquer estrutura de proteção construída na zona de transporte pode facilmente se transformar em acréscimo de detritos ao se colapsar, devido à alta energia e ao severo processo erosivo típicos desta zona.

Tabela 6.2. Velocidade e altura dos fluxos de detritos em função da trajetória percorrida.

Distância da zona de iniciação (m)	Altura do fluxo (m)			Velocidade máxima instantânea (m/s)		
	Corrego D'Antas Zona 1	Corrego D'Antas Zona 2	Hospital Sao Lucas	Corrego D'Antas Zona 1	Corrego D'Antas Zona 2	Hospital Sao Lucas
100	0,40	0,35	0,35	10,5	10,4	9,5
300	0,40	0,40	0,40	5,5	4,8	7,3
400	0,40	0,40	0,40	4,3	6,1	5,1
425	0,40	0,40	0,50	4,3	6,3	4,8
450	0,40	0,40	0,70	4,3	5,8	4,8
475	0,40	0,40	0,80	4,4	5,6	4,2
500	0,40	0,40	1,00	4,5	5,7	3,7
525	0,40	0,40	1,00	4,6	4,8	3,9
550	0,50	0,50	0,90	4,2	3,8	4
575	0,50	0,50	0,90	3,5	3,4	3,5
600	0,50	0,50	0,70	2,5	3,4	3,8
625	0,70	0,50	0,70	2,6	2,3	4,2
650	0,80	0,50	1,00	2,7	1,8	5
675	0,75	0,50	1,00	2,7	1,9	5,3
700	0,70	0,50	1,00	2,6	1,5	5,3
725	0,70	0,50	1,20	2,6	0,9	4,4
750	0,60	0,50	1,50	2	0,6	3,5
775			1,72			3,3
800			2,00			2,9

As Tabelas 6.3 a 6.8 apresentam a síntese dos resultados obtidos das análises dos modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos adotados para a determinação da pressão de impacto do fluxo de detritos. As análises completas são apresentadas em detalhes no Apêndice 1.

Tabela 6.3. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 2 - Córrego D'Antas Zonas 1 e 2.

Córrego D'Antas - Zona 1				Córrego D'Antas - Zona 2			
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 1	Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 1
	GRUPO 1	GRUPO 2			GRUPO 1	GRUPO 2	
400	33,7	81,4	2,4	400	33,7	163,7	4,9
425	33,7	81,4	2,4	425	33,7	174,6	5,2
450	33,7	81,4	2,4	450	33,7	148,0	4,4
475	33,7	85,2	2,5	475	33,7	138,0	4,1
500	33,7	89,1	2,6	500	33,7	143,0	4,2
525	33,7	93,1	2,8	525	33,7	101,4	3,0
550	42,2	77,6	1,8	550	42,2	63,5	1,5
575	42,2	53,9	1,3	575	42,2	50,9	1,2
600	42,2	27,5	0,7	600	42,2	50,9	1,2
625	59,1	29,7	0,5	625	42,2	23,3	0,6
650	67,5	32,1	0,5	650	42,2	14,3	0,3
675	63,3	32,1	0,5	675	42,2	15,9	0,4
700	59,1	29,7	0,5	700	42,2	9,9	0,2
725	59,1	29,7	0,5	725	42,2	3,6	0,1
750	50,6	17,6	0,3	750	42,2	1,6	0,0

Tabela 6.4. Valores de pressão de impacto obtidas com modelos do Grupo 1 e Grupo 2 - Hospital São Lucas.

Hospital São Lucas			
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 1
	GRUPO 1	GRUPO 2	
400	33,7	114,4	3,4
425	42,2	101,4	2,4
450	59,1	101,4	1,7
475	67,5	77,6	1,1
500	84,4	60,2	0,7
525	84,4	66,9	0,8
550	75,9	70,4	0,9
575	75,9	53,9	0,7
600	59,1	63,5	1,1
625	59,1	77,6	1,3
650	84,4	110,0	1,3
675	84,4	123,6	1,5
700	84,4	123,6	1,5
725	101,2	85,2	0,8
750	126,5	53,9	0,4
775	145,1	47,9	0,3
800	168,7	37,0	0,2

Tabela 6.5. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 3 - Córrego D'Antas - Zonas 1 e 2.

Córrego D'Antas - Zona 1				Córrego D'Antas - Zona 2			
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 3 / GRUPO 1	Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 3 / GRUPO 1
	GRUPO 1	GRUPO 3			GRUPO 1	GRUPO 3	
400	33,7	61,3	1,8	400	33,7	73,0	2,2
425	33,7	61,3	1,8	425	33,7	74,2	2,2
450	33,7	61,3	1,8	450	33,7	71,2	2,1
475	33,7	62,0	1,8	475	33,7	69,9	2,1
500	33,7	62,7	1,9	500	33,7	70,6	2,1
525	33,7	63,4	1,9	525	33,7	64,7	1,9
550	42,2	71,6	1,7	550	42,2	68,1	1,6
575	42,2	65,4	1,5	575	42,2	64,4	1,5
600	42,2	55,2	1,3	600	42,2	64,4	1,5
625	59,1	72,5	1,2	625	42,2	53,0	1,3
650	67,5	81,7	1,2	650	42,2	46,9	1,1
675	63,3	77,8	1,2	675	42,2	48,2	1,1
700	59,1	72,5	1,2	700	42,2	42,8	1,0
725	59,1	72,5	1,2	725	42,2	33,1	0,8
750	50,6	56,6	1,1	750	42,2	27,1	0,64

Tabela 6.6. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 1 e Grupo 3 - Hospital São Lucas.

Hospital São Lucas			
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 3 / GRUPO 1
	GRUPO 1	GRUPO 3	
400	33,7	66,7	2,0
425	42,2	76,5	1,8
450	59,1	98,5	1,7
475	67,5	101,9	1,5
500	84,4	113,0	1,3
525	84,4	116,0	1,4
550	75,9	108,6	1,4
575	75,9	101,6	1,3
600	59,1	87,7	1,5
625	59,1	92,2	1,6
650	84,4	131,4	1,6
675	84,4	135,3	1,6
700	84,4	135,3	1,6
725	101,2	141,3	1,4
750	126,5	149,0	1,2
775	145,1	160,3	1,1
800	168,7	168,3	1,0

Tabela 6.7. Valores de pressão de impacto obtidos com modelos do Grupo 2 e Grupo 3 - Córrego D'Antas - Zonas 1 e 2.

Córrego D'Antas - Zona 1					Córrego D'Antas - Zona 2				
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 3	Número de Froude	Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 3	Número de Froude
	GRUPO 3	GRUPO 2				GRUPO 3	GRUPO 2		
400	61,3	81,4	1,3	5,3	400	73,0	163,7	2,2	5,6
425	61,3	81,4	1,3	2,8	425	74,2	174,6	2,4	2,4
450	61,3	81,4	1,3	2,2	450	71,2	148,0	2,1	3,1
475	62,0	85,2	1,4	2,2	475	69,9	138,0	2,0	3,2
500	62,7	89,1	1,4	2,2	500	70,6	143,0	2,0	2,9
525	63,4	93,1	1,5	2,2	525	64,7	101,4	1,6	2,8
550	71,6	77,6	1,1	2,3	550	68,1	63,5	0,9	2,9
575	65,4	53,9	0,8	2,3	575	64,4	50,9	0,8	2,4
600	55,2	27,5	0,5	1,9	600	64,4	50,9	0,8	1,7
625	72,5	29,7	0,4	1,6	625	53,0	23,3	0,4	1,5
650	81,7	32,1	0,4	1,1	650	46,9	14,3	0,3	1,5
675	77,8	32,1	0,4	1,0	675	48,2	15,9	0,3	1,0
700	72,5	29,7	0,4	1,0	700	42,8	9,9	0,2	0,8
725	72,5	29,7	0,4	1,0	725	33,1	3,6	0,1	0,9
750	56,6	17,6	0,3	1,0	750	27,1	1,6	0,1	0,7

Tabela 6.8. Valores de pressão de impacto obtidos com os modelos do Grupo 2 e Grupo 3 - Hospital São Lucas.

Hospital São Lucas				
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de Impacto (kPa)		GRUPO 2 / GRUPO 3	Número de Froude
	GRUPO 3	GRUPO 2		
400	66,7	114,4	1,7	5,1
425	76,5	101,4	1,3	3,7
450	98,5	101,4	1,0	2,6
475	101,9	77,6	0,8	2,2
500	113,0	60,2	0,5	1,8
525	116,0	66,9	0,6	1,5
550	108,6	70,4	0,6	1,2
575	101,6	53,9	0,5	1,2
600	87,7	63,5	0,7	1,3
625	92,2	77,6	0,8	1,2
650	131,4	110,0	0,8	1,5
675	135,3	123,6	0,9	1,6
700	135,3	123,6	0,9	1,6
725	141,3	85,2	0,6	1,7
750	149,0	53,9	0,4	1,7
775	160,3	47,9	0,3	1,3
800	168,3	37,0	0,2	0,9

Os resultados obtidos com a avaliação dos modelos permitem várias observações e conclusões, sendo destacadas aquelas mais interessantes e importantes.

As alturas de fluxo obtidas das simulações com os programas DAN-W e DAN3D não são representativas e consistentes com os eventos reais, pois consideram o volume do fluxo de detritos como um fluxo equivalente. PORTELLA et al. (2013) encontraram, além dos detritos, grandes blocos com volume maior que 4m³, o que não está de acordo com a altura do fluxo obtida com os programas.

Em relação ao Número de Froude, diversos pesquisadores reportam a importância desse parâmetro nas forças de impacto de fluxo de detritos. Isto incentivou o desenvolvimento de análises do Número de Froude do caso estudado. A Tabela 6.9 apresenta, portanto, os resultados das análises do Número de Froude em função da distância percorrida pelos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras. Pode-se observar a variação de valores ao longo das trajetórias, indicando o tipo de regime de fluxo em cada zona típica dos movimentos.

Interessante ressaltar que as zonas de iniciação e de transporte mostram predominantemente valores de Número de Froude superiores a 1,0, correspondendo ao fluxo torrencial.

Tabela 6.9. Relação do Número de Froude e tipo de fluxo com a distância percorrida pelos fluxos de detritos.

Distância da zona de iniciação (m)	NUMERO DE FROUDE					
	Corrego D`Antas Zona 1		Corrego D`Antas Zona 2		Hospital São Lucas	
100	5,3	Torrencial	5,6	Torrencial	5,1	Torrencial
300	2,8	Torrencial	2,4	Torrencial	3,7	Torrencial
400	2,2	Torrencial	3,1	Torrencial	2,6	Torrencial
425	2,2	Torrencial	3,2	Torrencial	2,2	Torrencial
450	2,2	Torrencial	2,9	Torrencial	1,8	Torrencial
475	2,2	Torrencial	2,8	Torrencial	1,5	Torrencial
500	2,3	Torrencial	2,9	Torrencial	1,2	Torrencial
525	2,3	Torrencial	2,4	Torrencial	1,2	Torrencial
550	1,9	Torrencial	1,7	Torrencial	1,3	Torrencial
575	1,6	Torrencial	1,5	Torrencial	1,2	Torrencial
600	1,1	Torrencial	1,5	Torrencial	1,5	Torrencial
625	1,0	Crítico	1,0	Crítico	1,6	Torrencial
650	1,0	Crítico	0,8	Fluvial	1,6	Torrencial
675	1,0	Crítico	0,9	Fluvial	1,7	Torrencial
700	1,0	Crítico	0,7	Fluvial	1,7	Torrencial
725	1,0	Crítico	0,4	Fluvial	1,3	Torrencial
750	0,8	Fluvial	0,3	Fluvial	0,9	Fluvial
775					0,8	Fluvial
800					0,7	Fluvial

O modelo hidrostático de ARMANINI & SCOTTON (1992) foi desconsiderado, uma vez que apresenta resultados muito inferiores aos dos outros modelos.

O fator empírico de impacto dos modelos hidrostáticos adotado igual a 4,3, valor que equivale à média dos valores propostos na literatura, é considerado um valor aceitável. Porém, faz-se necessário revisar sempre as velocidades do fluxo, posto que os modelos hidrostáticos só servem quando as velocidades são baixas.

A comparação entre modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos é mais recomendada para fluxos de detritos com velocidades muito baixas e alturas elevadas. Isto se deve ao princípio básico de cada tipo de modelo. Por exemplo, BUGNION et al. (2011) mostram que a pressão de impacto hidrostática pode ser até 50 vezes menor que a dinâmica.

Considerando valores médios para o fator empírico de impacto, a comparação entre os modelos hidrostáticos e hidrodinâmicos de pressão de impacto dos grupos 1 e 2 fornece os seguintes resultados:

- i. Na zona de deposição do Córrego D'Antas Zona 1, a pressão de impacto calculada com o grupo 2 pode ser até 2,8 vezes maior que a do grupo 1 entre 400m e 575m. Em seguida, entre 600m e 750m, a pressão de impacto do grupo 2 é até 0,3 vezes menor que a do grupo 1;
- ii. Na zona de deposição do Córrego D'Antas Zona 2, a pressão de impacto do grupo 2 pode ser até 5,0 vezes maior que a do grupo 1 entre 400m e 600m. Entre 625m e 750m, a pressão do grupo 2 é até 0,1 vezes menor que a do grupo 1;
- iii. Na zona de deposição do Hospital São Lucas, a pressão calculada com o grupo 2 pode ser até 3,4 vezes maior que a do grupo 1 entre 400m e 700m e 0,2 menor entre 725m e 800m.

A comparação de resultados com o Número de Froude e o tipo de fluxo apresentado na Tabela 6.9 permite concluir que, quando o fluxo é crítico ou fluvial ou possui valores de Número de Froude até 1,3, a pressão de impacto dos modelos hidrostáticos será maior do que a pressão de impacto dos modelos hidrodinâmicos.

Em relação aos resultados de pressão de impacto calculadas com os modelos hidrodinâmicos do grupo 3 e os hidrostáticos do grupo 1, pode-se concluir que o grupo 3 fornece valores maiores em toda a zona de deposição nos casos do fluxo de detritos do

Córrego D'Antas Zona 1 e Hospital São Lucas. Já no caso do Córrego D'Antas Zona 2, o grupo 3 apresenta resultados até 0,64 vezes menores nos últimos 50m de deposição.

A comparação de resultados de pressão de impacto entre os modelos hidrodinâmicos sem e com Número de Froude do Grupo 2 e 3, respectivamente mostra que os valores do grupo 2 são 2,4 vezes maiores que os do grupo 3 até o Número de Froude atingir 2,5. Logo depois, o grupo 3 apresenta resultados maiores. Isto se deve à altura do fluxo que influencia os resultados do grupo 3.

6.2.2. Análises de energia de impacto de fluxos de detritos

No Capítulo 3 faz-se referência a duas abordagens da energia de impacto dos fluxos de detritos: tradicional baseada na energia cinética dos corpos e as modificadas que inserem conceitos de massa efetiva. Em geral os valores de energia de impacto obtidos com abordagem tradicional são superiores aos calculados com as outras abordagens modificadas. Por exemplo, a modificada proposta por DE NATALE et al. (1996) considera que somente uma parte do fluxo atua dinamicamente contra a barreira e depende da máxima deflexão desta, logo a energia de impacto se torna menor.

A Tabela 6.10 apresenta os valores de massa do fluxo de detritos determinados a partir das energias de impacto calculadas com a abordagem tradicional, M2, e a modificada de WENDERLER et al. (2008), M1, em função da trajetória do fluxo de detritos. Observa-se que os valores de massa obtidos com a abordagem tradicional da energia cinética dos corpos são até 2,4 vezes maiores que a massa calculada com a proposta modificada para os 3 casos de fluxos de detritos estudados.

Em adição, pesquisadores como SEGALINI et al. (2016) reportam que abordagem da energia cinética dos corpos fornece resultados de massa e energias de impacto muito maiores que os valores medidos em campo.

Tabela 6.10. Valores de massa de impacto dos fluxos de detritos obtidos com a abordagem modificada (M1) e tradicional (M2).

Córrego D'Antas Zona 1			
Distancia	M1= p.Q.T(ton)	M2= p .V(ton)	Relação M2/M1
100	110,7	185,0	1,7
300	130,3	228,1	1,8
400	185,4	358,3	1,9
425	185,4	358,3	1,9
450	185,4	358,3	1,9
475	185,4	358,3	1,9
500	185,4	358,3	1,9
525	221,1	449,2	2,0
550	221,3	449,6	2,0
575	221,3	449,6	2,0
600	221,3	449,6	2,0
625	221,3	449,6	2,0
650	221,3	449,6	2,0
675	221,1	449,2	2,0
700	221,1	449,2	2,0
725	221,1	449,2	2,0
750	221,1	449,2	2,0

Córrego D'Antas Zona 2			
Distancia	M1= p.Q.T(ton)	M2= p .V(ton)	Relação M2/M1
100	81,3	124,5	1,5
300	184,2	355,3	1,9
400	209,6	419,4	2,0
425	141,5	253,5	1,8
450	141,3	253,0	1,8
475	141,3	253,0	1,8
500	141,3	253,0	1,8
525	141,5	253,5	1,8
550	200,6	396,5	2,0
575	200,6	396,5	2,0
600	255,4	540,2	2,1
625	279,0	605,2	2,2
650	279,0	605,2	2,2
675	279,0	605,2	2,2
700	279,0	605,2	2,2
725	279,0	605,2	2,2
750	279,0	605,2	2,2

Hospital São Lucas			
Distancia	M1= p.Q.T(ton)	M2= p.V(ton)	Relação M2/M1
100	104,4	171,6	1,6
300	107,1	177,3	1,7
400	187,9	364,6	1,9
425	236,6	489,8	2,1
450	236,6	489,8	2,1
475	236,6	489,8	2,1
500	236,6	489,8	2,1
525	236,6	489,8	2,1
550	315,1	707,3	2,2
575	425,9	1040,8	2,4
600	190,1	370,1	1,9
625	190,1	370,1	1,9
650	190,1	370,1	1,9
675	204,6	406,5	2,0
700	204,6	406,5	2,0
725	204,6	406,5	2,0
750	190,1	370,1	1,9
775	190,1	370,1	1,9
800	190,1	370,1	1,9

6.2.3. Análises de modelos de força de impacto de queda de blocos

Em relação aos modelos de força de impacto de queda de blocos, todos consideram a velocidade e a dimensão do bloco, além de um fator empírico, cujo valor varia em função da proposta de cada autor. HUANG et al. (2007) apresentam o menor valor deste fator, o qual foi definido em ensaios de fluxos de detritos em modelos reduzidos. Em contrapartida, LIEN (2002) propõe os maiores valores do fator, baseando-se na teoria da colisão elástica.

Considerando os resultados de análises paramétricas complementares realizadas nesta pesquisa, o autor considera mais adequado usar o valor proposto por MIZUYAMA (1979), baseado nas medições de queda de blocos no Japão.

Uma difícil escolha na hora de analisar a força de impacto de queda de blocos é o valor do raio do bloco. Em geral, são avaliados os blocos remanescentes de fluxos de detritos reais, localizados na zona de deposição. Para isto, consideram-se os blocos encontrados depois do fluxo de detritos e relatórios técnicos sobre o evento ocorrido.

A partir das informações coletadas em campo de PORTELLA et al. (2013) e GEOMECÂNICA (2012), após os fluxos de detritos ocorridos no Morro Das Pedras, foi adotado um bloco esférico com volume de 6m^3 e raio igual a 1,13m para as análises da força de impacto da queda de blocos.

A Tabela 6.11 apresenta os resultados destas análises, lembrando que foi adotada a proposta de MIZUYAMA (1979). Note-se a progressiva diminuição da energia de impacto com o aumento da distância percorrida pelos 3 fluxos de detritos estudados.

Tabela 6.11. Forças de impacto de queda de blocos segundo modelo de MIZUYAMA (1979) dos fluxos de detritos do Morro Das Pedras.

Distância da zona de iniciação (m)	Força de Impacto (kN)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	10076	9961	8936
300	4638	3939	6514
400	3452	5251	4236
425	3452	5458	3939
450	3452	4943	3939
475	3548	4739	3355
500	3645	4841	2882
525	3743	3939	3070
550	3355	2976	3165
575	2696	2604	2696
600	1800	2604	2976
625	1887	1629	3355
650	1975	1214	4136
675	1975	1295	4436
700	1887	975	4436
725	1887	528	3548
750	1377	325	2696
775	821		2512
800	459		2151

6.2.4. Considerações finais das análises de modelos existentes na literatura

As análises desenvolvidas anteriormente permitem algumas observações relevantes. O número de Froude ganha importância caso se consiga determinar a altura do fluxo de detritos e sua velocidade. No fluxo de detritos do Morro Das Pedras existiram muitos

blocos de grandes dimensões e os programas computacionais não conseguiram modelar corretamente a altura do fluxo, pois consideram o fluxo de detritos como um fluxo equivalente.

Os modelos hidráulicos dinâmicos, que neste capítulo foi nomeado como grupo 2, são considerados os mais adequados para determinar a força e pressão de impacto. Os modelos dos grupos 1 e 3 exigem a determinação da altura do fluxo, de modo que seus resultados são muito influenciados pela qualidade e acurácia desta medida. Os modelos hidráulicos estáticos podem oferecer resultados consistentes quando se tem movimentos de massa com velocidades muito baixas e a altura do fluxo seja estimada corretamente.

O estabelecimento de uma relação entre a energia de impacto e a força de impacto não é recomendável, pois ela é influenciada por vários fatores que não podem ser calculados como a dissipação da energia ao longo do movimento.

A relação proposta por LUIS-FONSECA et al. (2011) deve ser usado com muito cuidado, pois considera a velocidade de fluxo de detritos constante, o que claramente já foi comprovado não ser verdadeiro.

6.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAN-W DE TESTES DE CAMPO

No capítulo anterior foram mencionados os dois únicos testes de campo da literatura, instrumentados para medir parâmetros como velocidade, altura do fluxo e esforços de impacto, a saber Ensaios de campo Pieve di Alpago e Veltheim.

Estes ensaios foram selecionados para o desenvolvimento de simulações numéricas com o programa bi dimensional DANW, cujos resultados são avaliados em relação às medições de campo. O conhecimento da capacidade deste programa em representar um evento real de fluxo de detritos é importante, tendo em vista que os parâmetros necessários para as análises numéricas são mais simples e em menor quantidade do que os exigidos pelo programa tridimensional DAN3D.

Além disto, vislumbrou-se a possibilidade de se obter diretamente parâmetros relacionados aos esforços de impacto em barreiras. Importante lembrar que os dois ensaios de campo foram instrumentados com células de carga, permitindo a determinação dos esforços de impacto dos fluxos de detritos nas barreiras.

6.3.1. Dados de entrada para a simulação

Pieve di Alpago

A topografia usada na simulação foi a estabelecida pelos pesquisadores: um canal de 40m de comprimento com inclinação de 40°. A largura do canal, considerado com fator da seção transversal de 0,67, inicia-se com 2m, sendo progressivamente aumentada até 20m, local de instalação da barreira flexível.

A reologia de Voellmy foi escolhida para simular este fluxo de detritos e foram usados parâmetros recomendados por KWAN (2012) para o coeficiente de turbulência e ângulo de atrito interno, os quais foram 500 e 11, respectivamente. A massa específica foi considerada igual a 20 kN/m³ e coeficiente de atrito de 0,3.

Foram realizados um total de 12 lançamentos de fluxos de detritos com volume aproximado de 40m³ por lançamento. Este volume foi adotado como o volume inicial do fluxo de detritos nas simulações numéricas. O ponto de controle de resultados do DAN-W foi selecionado em função da posição da barreira no ensaio de campo, instrumentada com células de carga.

Veltheim

A topografia usada na simulação do ensaio de campo Veltheim corresponde à do canal real com largura constante de 8m. O comprimento do canal é de 40m com inclinação de 30° e com fator da seção transversal igual a 1.

Foi usada a reologia de Voellmy com coeficiente de turbulência de 500 e ângulo de atrito interno igual a 11°. A massa específica foi adotada igual a 19 kN/m³ e o coeficiente de atrito igual a 0,2.

Foram realizados 16 testes de campo com diferentes configurações de lançamento com um volume de 50m³ aproximadamente. O ponto de controle estabelecido no DAN-W corresponde aos locais de instalação dos sensores de velocidade no canal de fluxo.

6.3.2. Dados de saída para a simulação

Pieve di Alpago

Os resultados mais relevantes das simulações com o programa DAN-W indicam que a velocidade máxima igual a 12,4m/s ocorre a uma distância horizontal de 19m aproximadamente, que é o ponto onde aumenta a largura do canal.

O volume final do fluxo de detritos simulado é de 41,0m³, valor consistente com o volume inicial de lançamento e a reduzida erodibilidade do canal, uma vez que foi preparado de forma a não sofrer processos erosivos. A área de deposição de 347,4m² não apresenta correspondência com a área real no ensaio, visto que se considerou um único lançamento.

A Tabela 6.12 apresenta os resultados mais importantes obtidos das simulações com o programa DAN-W e sua relação com os resultados reais obtidos da instrumentação de campo, especificamente as células de carga na barreira.

Tabela 6.12. Comparação de resultados numéricos do DAN-W e reais dos ensaios de Pieve di Alpago.

	Altura do fluxo no Ponto de Controle(m/s)	Velocidade Ponto de Controle(m/s)	Fator de Impacto	Pressão Impacto (kPa)
Modelagem DAN-W	0,72	7,49	3	302,9
Medições Pieve di Alpago	0,7	2.51 - 9	2,12	214,13

Comparando os resultados entre as medições in situ com os resultados da simulação, observa-se que a altura do fluxo no ponto de controle obtida numericamente é igual a altura média do fluxo de detritos registrada in situ. A velocidade no ponto de controle da simulação encontra-se dentro dos valores correspondentes às medições feitas pelas câmeras e instrumentação dos pesquisadores.

A pressão de impacto estimada da modelagem levou em consideração a velocidade no ponto de controle, a massa específica de 1800 kg/m³ e o fator de impacto proposto por KWAN (2012), obtendo como resultado 302,9 kPa. Este valor foi comparado aos do ensaio in situ registrados pelas células de carga em diferentes cabos, anteriormente apresentada no Capítulo 5 (Figura 5.14). Para fins de comparação, alguns ajustes foram adotados. Por exemplo, as células de carga 18 e 19 não foram consideradas, pois se localizam em altura elevada, incompatível com a altura do fluxo de detritos simulado

(primeiro lançamento). A célula de carga 21 também foi desprezada, pois sofre os efeitos de reação do fundo canal, registrando valores muito reduzidos.

Portanto, as células 15 e 20 foram selecionadas e seus valores foram tratados de forma a se considerar valores médios com desvio standard abrangendo 67% dos resultados. Este critério foi necessário, visto que os valores registrados apresentam grande variação, de 41kPa a 366kPa (conforme apresentado no Capítulo 5). Desta forma, obteve um valor de pressão de impacto médio de 214,1kPa, o que gera um fator de impacto de 2,12.

Finalmente, a comparação de resultados indica que a modelagem com o DAN-W e fator empírico de 2,12 é capaz de representar o fluxo de detritos de Pieve di Alpago. Note-se que fatores de impacto entre 2 e 3 têm sido propostos na literatura para as análises de fluxos de detritos.

Veltheim

A simulação do ensaio de fluxo de detritos de Veltheim com o programa DAN-W foi realizada tomando-se como pontos de controle aqueles indicados pela posição 1 e pela barreira da Figura 5.13, apresentada no Capítulo 5.

A velocidade máxima fornecida pela simulação é igual a 8,9m/s e corresponde ao valor de impacto na barreira. O volume final de fluxo de detritos obtido da simulação é de 49,9m³, similar aos 50m³ da medição in situ, que foi o valor do volume inicial do fluxo de detritos de Veltheim.

BUGNION et al. (2011) não especificam o valor da área de deposição após a conclusão do, o que impede a comparação com o valor fornecido pelo DAN-W e igual a 287,7m².

A Tabela 6.13 mostra os resultados obtidos numericamente e os valores medidos nos ensaios de campo, no ponto de controle (posição 1 no canal) e na barreira flexível. A altura do fluxo da modelagem é de 0,41 m, valor próximo da média das alturas medidas em campo no ponto de controle (com média de 0,56 m e valores entre 0,29 m e 0,99 m). A mesma concordância de valores é observada para a velocidade do fluxo no ponto de controle. O DAN-W fornece 8,4m/s e os registros dos ensaios de campo indicam uma média de 8,9 m/s, considerando a variação de 5,3 m/s a 10,4 m/s no ponto de controle e de 5,2m/s a 11,9m/s na posição das células de carga.

Tabela 6.13. Comparação de resultados numéricos do DAN-W e reais dos ensaios de Veltheim.

	Altura do fluxo no Ponto de Controle(m/s)	Velocidade Ponto de Controle(m/s)	Fator de Impacto	Pressão Impacto (kPa)
Modelagem DAN-W	0,41	8,38	3	400,3
Medições Veltheim	0,56	8,9	0.4 -0.8	28 -200

Em relação à pressão de impacto, BUGNION et al. (2011) mediram a velocidade e a pressão de impacto em duas células de carga de diferentes tamanhos com diferentes áreas, obtendo distintos valores do fator de impacto nos lançamentos: variação do fator de impacto de 0,4 a 1,0 para a placa maior, e de 0,4 a 1,8 para a placa menor. Essas medidas sofrem a influência da área das placas. Ressalte-se que a pressão de impacto medida mostra uma faixa de valores muito ampla, de 28 kPa até 200 kPa, e o valor máximo (200 kPa) é atingido com um fator de impacto de 1,5, em lugar de 3, adotado na modelagem.

Os fatores de impacto variando entre 2 e 3 oferecem resultados consistentes de pressões de impacto. Porém, sugere-se usar o maior (3) para fins de segurança de projetos.

Dos resultados obtidos nas simulações, pode-se concluir que o programa DAN-W conseguiu representar os fluxos de detritos dos ensaios de campo de Veltheim.

6.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DAN-W MORRO DUAS PEDRAS

As análises numéricas com o programa DAN-W foram desenvolvidas com a finalidade de comparar os resultados em função de reologias distintas e permitir a obtenção da velocidade de impacto a ser usada para estimativas de esforços de impacto nas barreiras. Desta forma, algumas características foram adotadas iguais às de pesquisas anteriores, tais como topografia e divisão do fluxo de detritos de Córrego D'Antas em Zona 1 (Canais 1 e 4) e Zona 2 (Canais 2 e 3), conforme estratégia de VALVERDE (2016). Uma das diferenças entre as simulações desta pesquisa com aquelas de VALVERDE (2016) reside no uso da reologia de atrito.

Foram realizadas 3 simulações para os fluxos de detritos do Morro Duas Pedras: Córrego D'Antas Zona 1, Córrego D'Antas Zona 2 e Hospital São Lucas. O fator da seção

transversal foi considerado 0,67 para todas as simulações, que corresponde a um canal elíptico e em cada simulação foram considerados 4 materiais diferentes.

KWAN (2012) considera que os materiais da zona de deposição devem ter um ângulo de atrito entre 20° e 25°, e em todas as simulações foram considerados os mesmos valores para o ângulo de atrito basal e o ângulo de atrito interno. O manual do DAN-W reporta que a reologia do modelo não é muito sensível em relação ao ângulo de atrito interno.

6.4.1. Dados de entrada para a simulação

Córrego D'Antas Zona 1

Na análise do fluxo de detritos do Córrego D'Antas foram considerados 4 materiais diferentes, todos com a mesma reologia de atrito: 2 materiais para a composição da zona de transporte, 1 material para a zona de iniciação e outro para a zona de deposição. A Tabela 6.14 apresenta os dados de entrada dos materiais usados na simulação.

Tanto para a zona 1 como para a zona 2, o material da zona de iniciação é considerado um material granular, rocha sã. Para a zona de transporte são dois materiais, o primeiro é considerado uma rocha alterada ou fragmentos de rochas e o segundo é considerado um solo com detritos, e na zona de deposição se tem um solo residual.

Tabela 6.14. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1.

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Massa específica (kN/m ³)	26	22	18	16
Ângulo de atrito basal	35	31	25	22
Profundidade de erosão (m)	0,1	0,2	0,5	0
Ângulo de atrito interno	35	31	25	22

O volume inicial adotado para o fluxo de detritos do Córrego D'Antas Zona 1 é 1000 m³ e a Figura 6.3 apresenta o perfil topográfico da geometria usada para a análise.

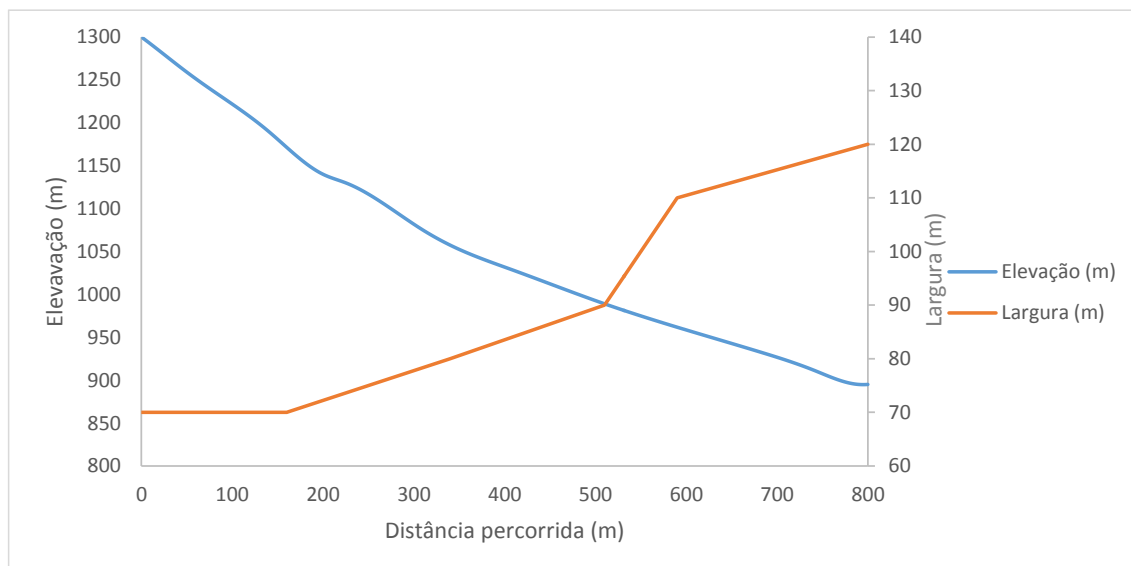


Figura 6.3. Perfil topográfico do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1.

Córrego D'Antas Zona 2

Nesta simulação foram considerados os materiais das zonas e o perfil topográfico apresentados na Tabela 6.15 e na Figura 6.4, respectivamente. O volume inicial do fluxo de detritos foi adotado igual a 500m^3 .

Os materiais constituintes das zonas são: rocha sã para a zona de iniciação; zona de transporte com dois materiais, o primeiro, solo mais fragmentos de rocha e o outro, solo mais detrito; e solo residual na zona de deposição.

Tabela 6.15. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 2.

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Massa específica (kN/m ³)	26	22	18	16
Ângulo de atrito basal	35	29	25	23
Profundidade de erosão (m)	0,1	0,1	0,5	0
Ângulo de atrito interno	35	29	25	23

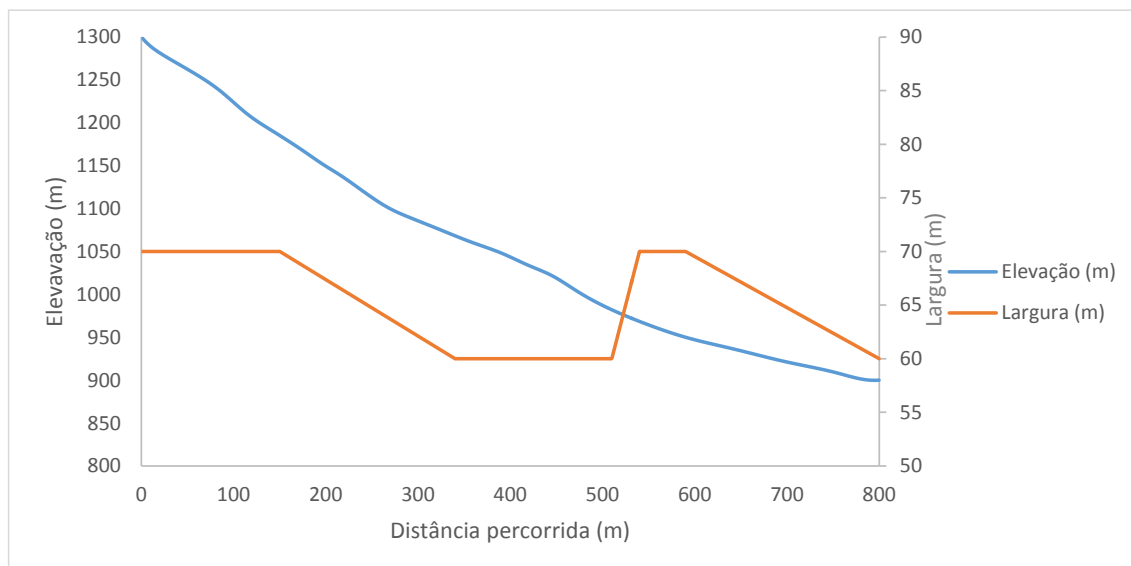


Figura 6.4. Perfil topográfico do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 2.

Hospital São Lucas

Os materiais usados na análise do fluxo de detritos Hospital São Lucas são apresentados na Tabela 6.16. O material na zona de iniciação é uma rocha sã. A zona de transporte é constituída por rocha pouco alterada e rocha com detritos e, finalmente, a zona de deposição tem solo com tálus e colúvios.

A Figura 6.5 ilustra o perfil topográfico usado para a simulação do fluxo de detritos. O programa DAN-W simula o fluxo de detritos como um fluxo equivalente, e para o qual deve ser inserido o perfil de elevação e o perfil de largura do canal.

Tabela 6.16. Materiais adotados para a simulação do fluxo de detritos Hospital São Lucas.

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Massa específica (kN/m ³)	26	22	20	16
Ângulo de atrito basal	35	30	25	21
Profundidade de erosão (m)	0,1	0,3	0,5	0
Ângulo de atrito interno	35	30	25	21

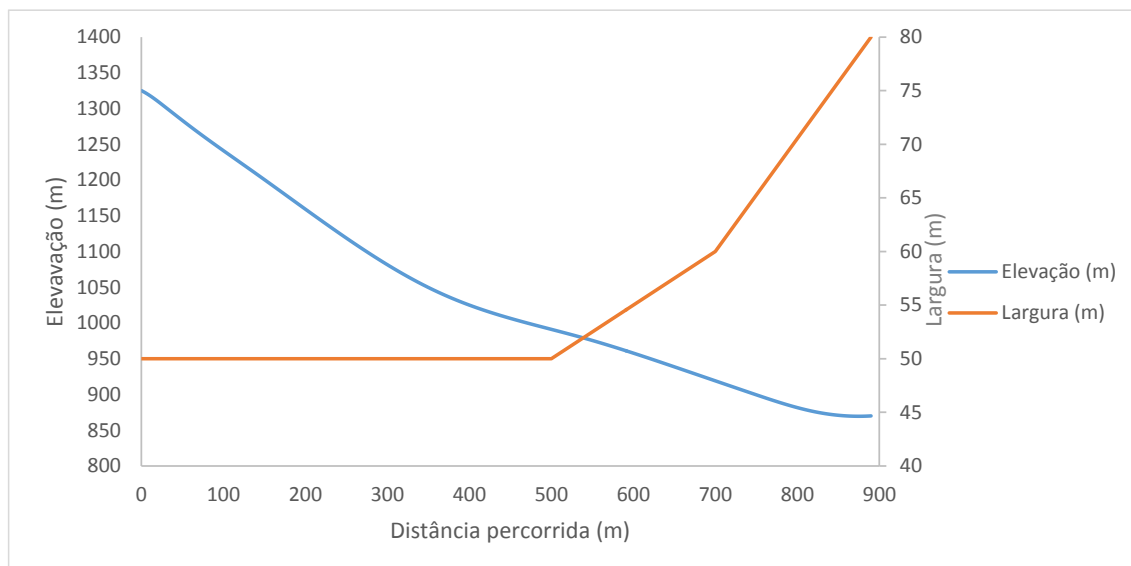


Figura 6.5. Perfil topográfico do fluxo de detritos Hospital São Lucas.

6.4.2. Dados de saída da simulação

Córrego D'Antas Zona 1

Os principais dados de saída da simulação são distância percorrida pelo fluxo de detritos, área de deposição, volume final, velocidade e altura do fluxo, e se encontram sumariados e comparados aos valores reais observados no evento de fluxo de detritos na Tabela 6.17.

Tabela 6.17. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1.

Parâmetro	Valores observados e calculados		Diferença percentual
	Real	DAN-W	DAN-W/Real
Distância Percorrida (m)	780	716	8
Volume Final (m3)	10000	10487	5
Área de deposição (m2)	20000	18000	10

A análise dos resultados permite concluir que o programa DAN-W consegue representar adequadamente o fluxo de detritos e as diferenças percentuais entre valores numéricos e reais variam entre 5 e 10%.

A Tabela 6.18 apresenta os valores obtidos numericamente de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. A altura máxima de 1,05m ocorre no ponto de controle correspondente a 425m, no início da zona de deposição. Isto se conflita com a situação real observada no campo, uma vez que fira depositados blocos de grandes dimensões, com raios equivalentes superiores a 1m. Como reportado por alguns pesquisadores, o programa DAN-W pode não representar adequadamente a altura de fluxos de detritos com grandes volumes.

A velocidade máxima do fluxo de detritos de 15,9m/s é atingida no ponto de controle correspondente a 475m da trajetória.

Tabela 6.18. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1.

	Vel max (m/s)	H max (m)
100	12,33	0,42
300	15,92	0,88
400	15,41	1,01
425	15,72	1,05
450	15,88	1,00
475	15,94	0,95
500	15,57	0,81
525	15,35	0,87
550	14,34	0,74
575	13,31	0,73
600	12,08	0,83
625	10,55	0,84
650	8,74	0,66
675	7,50	0,54
700	4,95	0,30
714	3,02	0,17

Córrego D'Antas Zona 2

A Tabela 6.19 mostra e compara os valores reais e obtidos numericamente referentes à distância percorrida, volume final e a área de deposição do fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 2. As diferenças percentuais entre os parâmetros calculados e medidos varia entre 6 e 9%, indicando uma representação consistente do fluxo de detritos real pela modelagem com o DAN-W.

A Tabela 6.20 apresenta os valores obtidos numericamente de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. A altura máxima de 2,12m ocorre no ponto de controle correspondente a 300m, na zona de transporte e velocidade máxima de 20,3m/s em 500m. Estes valores não podem ser comparados ao do evento, visto que eles não foram registrados. Entretanto, testemunhos dos poucos sobreviventes informam que o fluxo foi muito rápido e cobriu completamente muitas casas na área. Por conseguinte, a altura máxima do fluxo deve ter valores superiores aos indicados pela simulação numérica.

Tabela 6.19. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.

Parâmetro	Valores observados e calculados		Diferença percentual
	Real	DAN-W	DAN-W/Real
Distância Percorrida	770	720	6
Volume Final (m3)	7000	7568	8
Área de deposição	15000	13579	9

Tabela 6.20. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Córrego D’Antas Zona 2.

	Vel max (m/s)	H max (m)
100	15,95	0,22
300	15,92	2,12
400	14,50	0,93
425	15,40	0,74
450	17,37	0,56
475	19,95	0,46
500	20,63	0,43
525	20,57	0,39
550	20,13	0,39
575	19,24	0,46
600	17,62	0,48
625	15,65	0,60
650	13,74	0,66
675	11,63	0,70
700	8,62	0,53
720	4,42	0,26

Hospital São Lucas

O fluxo de detrito do Hospital São Lucas teve a maior distância percorrida dentre os 3 fluxos de detritos do Morro Das Pedras. As simulações com o programa DAN-W foram consistentes e conseguiram representar o movimento real. A Tabela 6.21 mostra e compara os valores calculados e reais, com diferenças percentuais variando entre 1 e 13%.

A Tabela 6.22 apresenta os valores calculados de velocidade e altura máximas em função da trajetória percorrida pelo fluxo de detritos. A altura máxima de 2,12m ocorre no ponto de controle correspondente a 300m, na zona de transporte e velocidade máxima de 20,3m/s em 500m. Estes valores não podem ser comparados ao do evento, visto que eles não foram registrados. Entretanto, testemunhos dos poucos sobreviventes informam que o fluxo foi muito rápido e cobriu completamente muitas casas na área. Por conseguinte, a altura máxima do fluxo deve ter valores superiores aos indicados pela simulação numérica.

Tabela 6.21. Comparação de valores numéricos do DAN-W e reais observados no fluxo de detritos Hospital São Lucas.

Parâmetro	Valores observados e calculados		Diferença percentual
	Real	DAN-W	DAN-W/Real
Distância Percorrida	830	840	1
Volume Final (m3)	12000	10967	9
Área de deposição	25000	21732	13

Os relatórios e estudos anteriores deste fluxo e detritos reportam a chegada de grandes blocos de rocha na zona de deposição, atingindo inclusive instalações do Hospital São Lucas.

Na Tabela 6.22 nota-se que a altura máxima do fluxo é igual a 2,3 ocorre a 400m do início da trajetória, no início da zona de deposição. Portanto, os valores calculados não conseguem representar os grandes blocos ao final da trajetória. Observa-se também que as velocidades do fluxo calculadas com a simulação são altas, inclusive na zona de deposição.

Tabela 6.22. Velocidade e altura máximas obtidas com o DAN-W para o fluxo de detritos Hospital São Lucas.

	Vel max (m/s)	H max (m)
100	20,46	0,40
300	26,73	1,49
400	20,00	2,26
425	19,63	2,12
450	19,27	2,03
475	18,66	1,95
500	17,92	1,85
525	17,17	1,66
550	16,52	1,44
575	15,98	1,23
600	15,54	1,06
625	15,65	0,60
650	14,92	0,81
675	14,69	0,72
700	14,48	0,65
725	14,27	0,58
750	14,04	0,53
775	13,56	0,67
800	12,39	0,83
825	9,89	0,82
840	7,27	0,63

6.5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA ROCKFALL DO MORRO DUAS PEDRAS

As análises numéricas com o programa Rocfall para queda de blocos foram desenvolvidas para os fluxos de detritos visando quantificar a energia envolvida no movimento de massa e tentar comparar com os resultados das outras simulações. Uma grande diferença desta simulação com as outras, é que o programa Rocfall considera o fluxo de detritos como uma massa sem forma e sem volume, concentrada em um ponto (Método de massa concentrada).

6.5.1. Dados de entrada para a simulação

Para as simulações no programa Rocfall, foram consideradas as mesmas condições topográficas do programa DAN-W, e foi assumido uma análise estatística de 10000 lançamentos de blocos. O fluxo de detrito foi considerado como um bloco de massa igual a 16000 kg, equivalente a um bloco de 6m³, e com um valor de massa específica de 2700

kg/m³. Estas características de bloco foram adotadas em função da presença de blocos similares, reportadas pelas investigações da área do Hospital São Lucas.

A Tabela 6.23 apresenta as características dos materiais ao longo da superfície da encosta. Os coeficientes de restituição normal e tangencial dos materiais foram selecionados em função das suas propriedades. Os ângulos de atrito escolhidos foram similares aos da simulação do DAN-W. Os valores indicados na tabela apresentam os respectivos desvios standard considerados nas análises com o Rockfall.

Tabela 6.23. Materiais adotados para a simulação dos fluxos de detritos com Rocfall.

Córrego D'Antas - Zona 1

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Rn/ des. Stand.	0,35/0	0,3/0	0,47/0	0,32/0,04
Rt / des. Stand.	0,85/0	0,7/0	0,55/0	0,8/0,04
Ângulo de atrito / des. Stand.	35/0	31/0	25/2	22/2

Córrego D'Antas - Zona 2

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Rn/ des. Stand.	0,35/0	0,3/0	0,47/0	0,32/0,04
Rt / des. Stand.	0,85/0	0,7/0	0,55/0	0,8/0,04
Ângulo de atrito / des. Stand.	35/0	29/2	25/3	22/3

Hospital São Lucas

Dados de entrada	Material Z. Iniciação	Material Z. Transporte 1	Material Z. Transporte 2	Material Z. Deposição
Rn/ des. Stand.	0,35/0	0,3/0	0,47/0	0,32/0,04
Rt / des. Stand.	0,85/0	0,7/0	0,55/0	0,8/0,04
Ângulo de atrito / des. Stand.	35/2	30/0	26/4	22/4

6.4.2. Dados de saída para a simulação

Os principais resultados do programa RocFall são a velocidade e a energia, cujos valores são apresentados na Tabela 6.24. Nota-se que o programa RocFall não consegue representar adequadamente a distância percorrida pelo fluxo de detritos. Isto era esperado, uma vez que o RocFall foi criado para quedas de blocos.

A Figura 6.6 mostra a variação da velocidade em função da trajetória para os 3 fluxos de detritos. Observa-se diversos picos para os 3 fluxos de detritos, devido a elevada sensibilidade do programa em relação à topografia do canal. Uma pequena mudança na inclinação, gera picos de valores, tanto de velocidade como de energia.

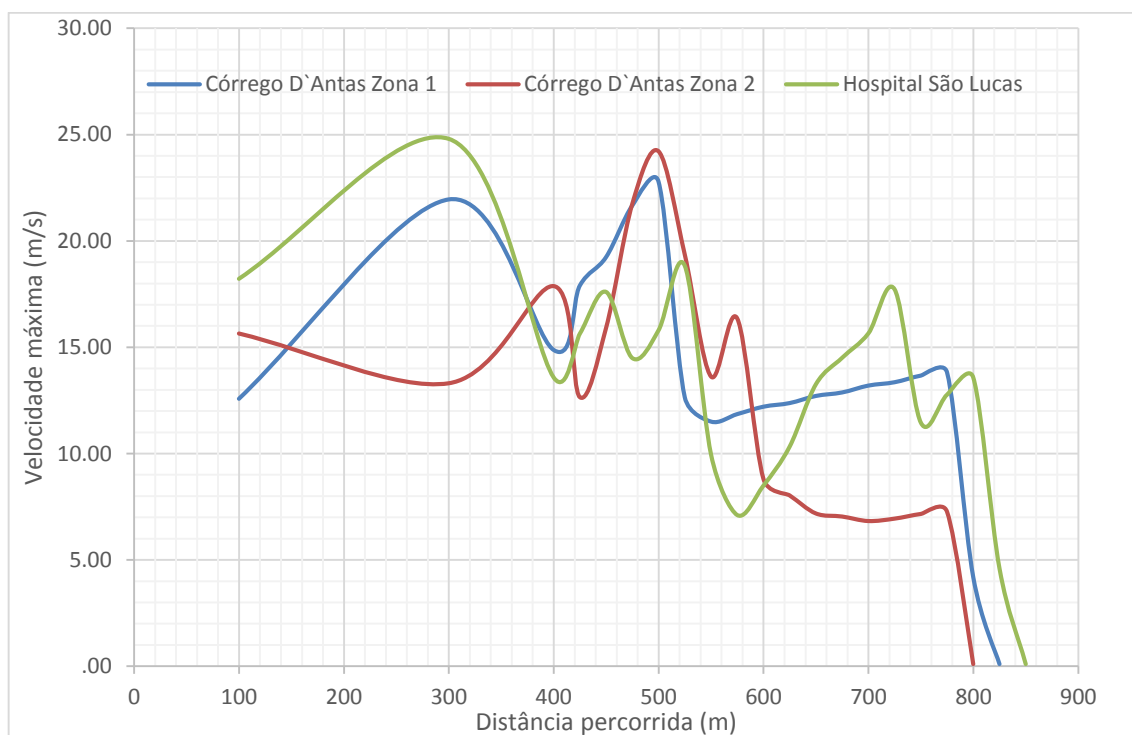


Figura 6.6. Variação da velocidade obtida com Rocfall em função da distância percorrida para os fluxos de detritos do Morro Duas Pedras.

A Tabela 6.24 apresenta os valores calculados com Rocfall de velocidade máxima e energia cinética, os quais são considerados consistentes com os valores esperados para os casos dos fluxos de detritos do morro Duas Pedras. Observa-se que a energia cinética atinge valores inferiores a 2700kJoules ao final da zona de deposição, definindo, desta forma, o posicionamento de estruturas de proteção que resistiriam ao impacto do fluxo de detritos.

Tabela 6.24. Valores de velocidade máxima e energia cinética obtidas com RocFall para os fluxos de detritos.

Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)			Energia cinética (kJoules)		
	Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas	Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	12,6	15,6	18,2	1571	2066	3080
300	22,0	13,3	24,8	3911	1448	6329
400	14,9	17,9	13,6	1908	2647	2104
425	17,9	12,7	15,6	2712	1808	2451
450	19,2	15,9	17,6	3114	2433	2978
475	21,7	21,8	14,5	3918	4054	2238
500	22,8	24,2	15,8	4320	4875	2432
525	12,6	19,4	18,8	1902	4182	3179
550	11,5	13,6	10,0	1678	2090	1276
575	11,9	16,4	7,1	1538	2666	749
600	12,2	8,8	8,5	1606	940	685
625	12,4	8,0	10,3	1640	792	913
650	12,7	7,2	13,3	1708	660	1473
675	12,9	7,0	14,5	1742	600	1753
700	13,2	6,8	15,7	1810	563	2033
725	13,4	6,9	17,7	1844	546	2593
750	13,7	7,2	11,5	1912	531	1515
775	13,8	7,3	12,8	1946	543	1688
800	4,2	0,1	13,6	370	0	1859
825	0,1		4,6	0		376
850			0,1			0

6.6. COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES RESULTADOS

A partir dos resultados das pesquisas anteriores associados aos resultados das novas simulações, obtém-se um banco de dados usando diferentes modelos reológicos e programas, os quais são comparados e avaliados em função de velocidade, altura, Número de Froude, energia e pressão de impacto dos fluxos de detritos.

Velocidade do fluxo

Nesta pesquisa foram realizadas simulações com os programas DAN-W e Rocfall usando uma mesma reologia de atrito. Por sua vez, VALVERDE (2016) realizou simulações com os programas DAN-W e DAN3D com a reologia de Voellmy.

As Tabelas 6.25 e 6.26 mostram, respectivamente, os resultados de VALVERDE (2016) e desta pesquisa, permitindo 3 tipos de comparação de valores de velocidade:

- i. Mesmo programa com reologias diferentes, velocidades calculadas com o programa DAN-W com reologias de atrito e Voellmy;
- ii. Programas diferentes com a mesma reologia, velocidades calculadas com os programas DAN3D e DAN-W com reologia de atrito;
- iii. Programas diferentes com a mesma reologia, velocidades calculadas com os programas DAN-W e Rocfall com reologia de Voellmy.

Os resultados das comparações se encontram apresentados por meio de diferenças percentuais na Tabela 6.27 e por meio gráfico nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

Tabela 6.25. Velocidades dos fluxos de detritos de VALVERDE (2016).

DAN3D - Reologia de Voellmy				DAN-W - Reologia de Voellmy			
Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)			Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas		Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	10,5	10,4	9,5	100	9,9	6,53	11,6
300	5,5	4,8	7,3	300	3,2	2,42	8,8
400	4,3	6,1	5,1	400	3,53	5,5	5,8
425	4,3	6,3	4,8	425	4,2	6,7	5,2
450	4,3	5,8	4,8	450	4,5	7,5	4,7
475	4,4	5,6	4,2	475	4,8	7,9	4,3
500	4,5	5,7	3,7	500	4,8	8	3,7
525	4,6	4,8	3,9	525	4,7	7,8	3,3
550	4,2	3,8	4	550	4,2	6,9	2,5
575	3,5	3,4	3,5	575	3,8	5,8	1,8
600	2,5	3,4	3,8	600	3,53	4,66	1,7
625	2,6	2,3	4,2	625	3,53	3,1	2,4
650	2,7	1,8	5	650	3,53	0,1	2,6
675	2,7	1,9	5,3	675	3,8		2,5
700	2,6	1,5	5,3	700	4,1		1,9
725	2,6	0,9	4,4	725	4,1		1,3
750	2	0,6	3,5	750	3,7		2,0
775	1,3		3,3	775	2,6		2,1
800	0,8		2,9	800	0,8		1,4

Tabela 6.26. Velocidades dos fluxos de detritos desta pesquisa.

DAN-W - Reologia de Atrito				RocFall - Reologia de Atrito			
Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)			Distância da zona de iniciação (m)	Velocidade máxima instantânea (m/s)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas		Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	12,3	16,0	20,5	100	12,6	15,6	18,2
300	15,9	15,9	26,7	300	22,0	13,3	24,8
400	15,4	14,5	20,0	400	14,9	17,9	13,6
425	15,7	15,4	19,6	425	17,9	12,7	15,6
450	15,9	17,4	19,3	450	19,2	15,9	17,6
475	15,9	20,0	18,7	475	21,7	21,8	14,5
500	15,6	20,6	17,9	500	22,8	24,2	15,8
525	15,4	20,6	17,2	525	12,6	19,4	18,8
550	14,3	20,1	16,5	550	11,5	13,6	10,0
575	13,3	19,2	16,0	575	11,9	16,4	7,1
600	12,1	17,6	15,5	600	12,2	8,8	8,5
625	10,6	15,7	15,7	625	12,4	8,0	10,3
650	8,7	13,7	14,9	650	12,7	7,2	13,3
675	7,5	11,6	14,7	675	12,9	7,0	14,5
700	5,0	8,6	14,5	700	13,2	6,8	15,7
725	3,0	2,2	14,3	725	13,4	6,9	17,7
750	0,1	0,1	14,0	750	13,7	7,2	11,5
775			13,6	775	13,8	7,3	12,8
800			12,4	800	4,2	0,1	13,6
825			9,9	825	0,1		4,6
850			4,1	850			0,1

Pode-se observar nas Tabelas 6.25 a 6.27 que os valores de velocidade são muito diferentes em função da reologia e do programa numérico utilizado para sua determinação. Isto surpreende, considerando-se que os valores de distância percorrida, área de deposição e volume final do fluxo sejam similares, mesmo quando calculados com diferentes reologias.

As diferenças percentuais são muito elevadas quando comparados os valores de velocidade obtidos com diferentes reologias e o mesmo programa computacional, podendo ser até dez vezes maior. Portanto, a escolha da reologia é muito importante quando se avalia a força de impacto em função da velocidade do fluxo de detritos. As velocidades calculadas com reologia de atrito são sempre superiores às velocidades calculadas com a reologia de Voellmy em toda a trajetória dos três fluxos de detritos do morro Duas Pedras.

Tabela 6.27. Diferenças percentuais entre os valores de velocidade obtidos das diferentes simulações.

Distância da zona de iniciação (m)	DAN3D Voellmy -DANW Voellmy			Distância da zona de iniciação (m)	DANW Voellmy - DANW Atrito		
	Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas		Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	-6	-37	22	100	25	144	76
300	-42	-50	21	300	398	558	204
400	-18	-10	14	400	337	164	245
425	-2	6	8	425	274	130	278
450	5	29	-2	450	253	132	310
475	9	41	1	475	232	153	339
500	7	40	0	500	224	158	384
525	2	63	-15	525	227	164	420
550	0	82	-38	550	241	192	561
575	9	71	-49	575	250	232	788
600	41	37	-55	600	242	278	814
625	36	35	-43	625	199	405	552
650	31		-48	650	148		474
675	41		-53	675	97		488
700	58		-64	700	21		662
725	58		-70	725	26		998
750	85		-43	750			602
775	100		-36	775			546
800	0		-52	800			785

Distância da zona de iniciação (m)	DANW Atrito - Rocfall Atrito		
	Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	2	-2	-11
300	38	-16	-7
400	-3	23	-32
425	14	-18	-20
450	21	-8	-9
475	36	9	-22
500	46	17	-12
525	-18	-6	10
550	-20	-32	-40
575	-11	-15	-56
600	1	-50	-45
625	17	-49	-34
650	45	-48	-11
675	72	-39	-1
700	167	-21	8
725	342	217	24
750			-18
775			-6
800			10

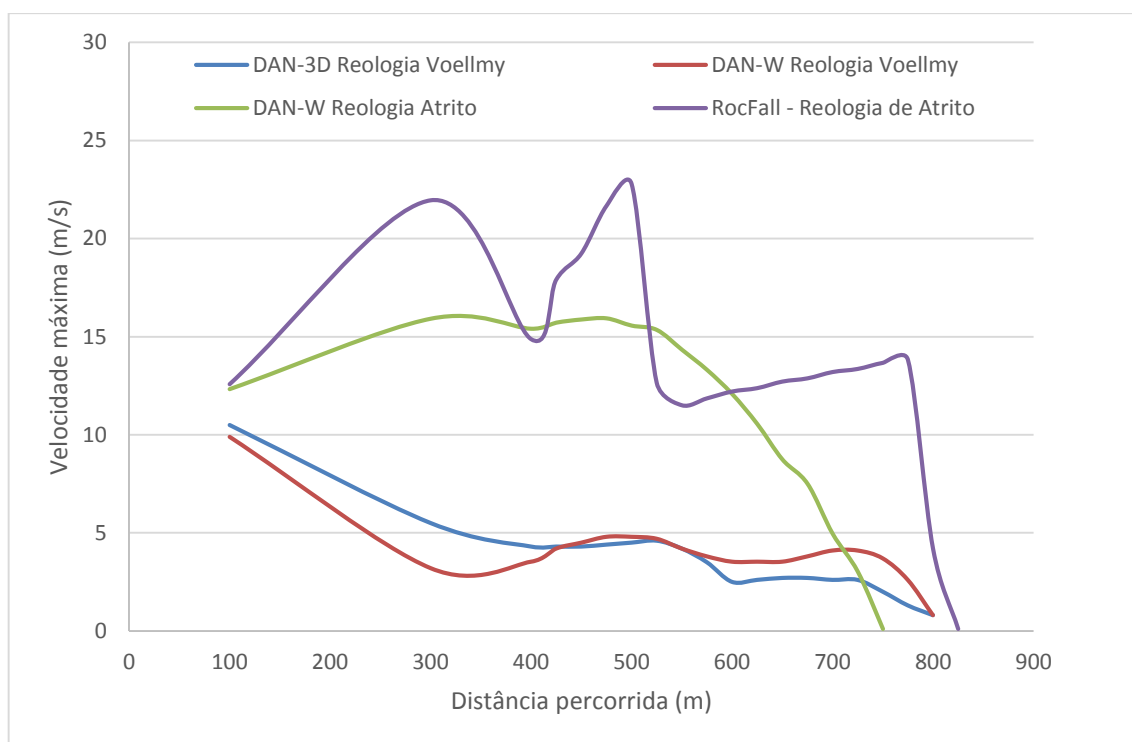


Figura 6.7. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico - Córrego D'Antas Zona 1.

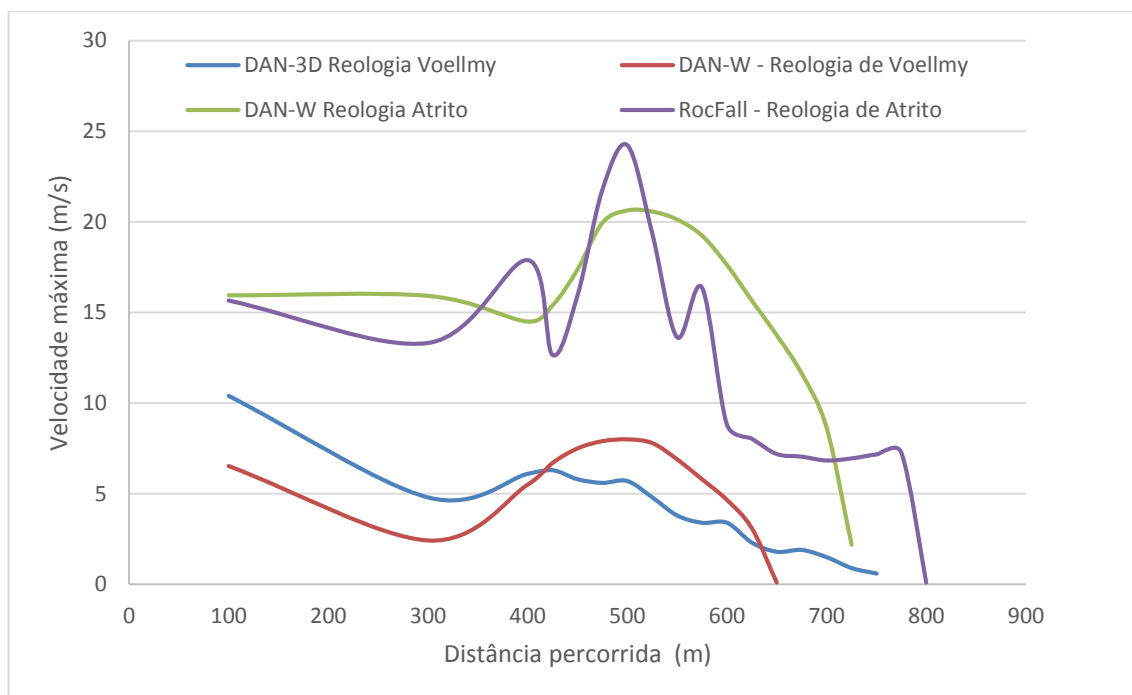


Figura 6.8. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico - Córrego D'Antas Zona 2.

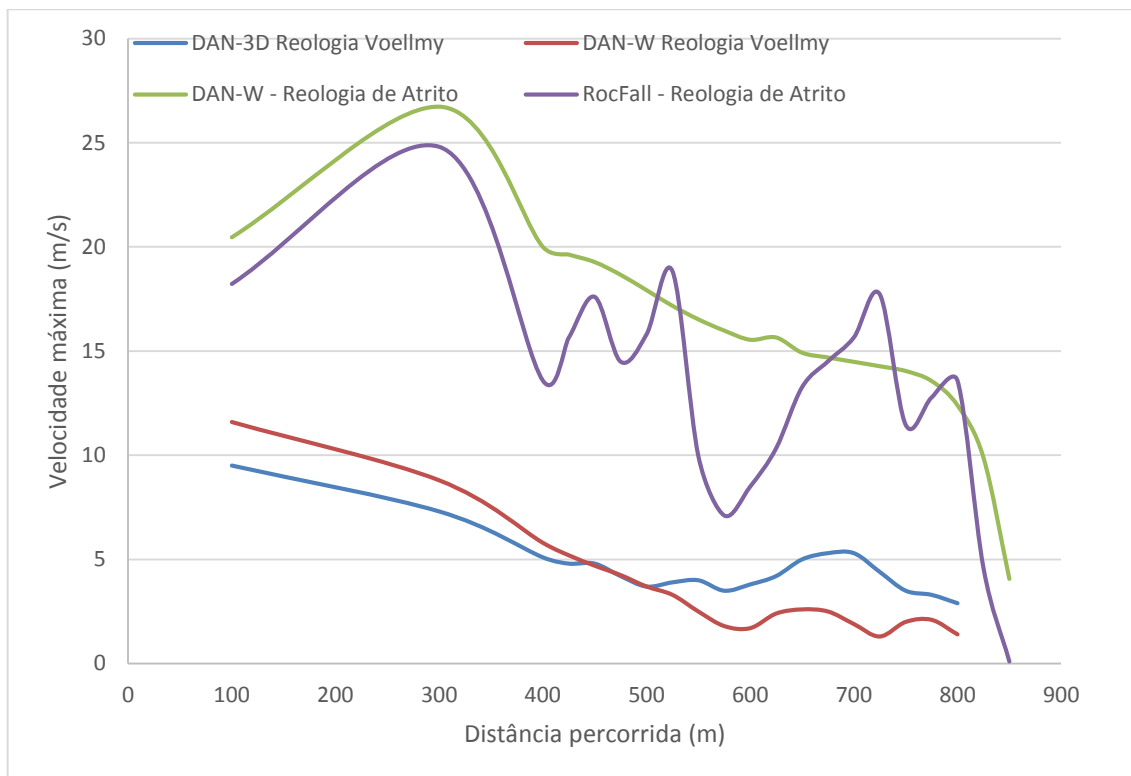


Figura 6.9. Variação da velocidade do fluxo de detritos em função da trajetória, da reologia e do programa numérico – Hospital São Lucas.

Das figuras 6.7, 6.8 e 6.9, observa-se a grande diferença entre os valores das velocidades obtidas com reologias distintas. As velocidades calculadas com reologia de Voellmy são inferiores às calculadas com a reologia de atrito.

A variação da velocidade com a trajetória obtida com o Rocfall apresenta muitos picos, ao contrário das outras curvas, mais suaves, obtidas com DAN3D e DAN-W. Como mencionado anteriormente, a ocorrência de picos se deve às irregularidades topográficas da superfície do canal.

Analisando-se o uso da mesma reologia com diferentes programas, tem-se dois casos diferentes: O de VALVERDE (2016) com os programas DAN-W e DAN3D e reologia de Voellmy, e desta pesquisa com os programas DAN-W e Rocfall.

VALVERDE (2016) analisou os pontos de controle a cada 100m somente, e concluiu que as modelagens dos programas DAN-W e DAN3D fornecem velocidades consistentes entre si. Entretanto, analisando os valores de pontos de controle a cada 25m, verifica-se variações significativas nos valores instantâneos. Observando as diferenças percentuais

da mesma reologia de Voellmy, mas usando programas diferentes, as diferenças percentuais aumentam no final da zona de deposição.

Ao comparar a mesma reologia para diferentes programas, a maioria das diferenças percentuais são inferiores a 100%, pouquíssimos valores no final da zona de deposição superam 100% de diferença percentual; a maioria de valores se encontram entre 0 e 50%.

Altura do fluxo

A altura do fluxo é um parâmetro importante para calcular a pressão de impacto quando as velocidades do fluxo são muito baixas. A altura do fluxo foi bem representada nas simulações dos casos dos ensaios de campo, porém isto não ocorre com a simulação dos fluxos de detritos do Morro Das Pedras. Isto se deve provavelmente a maior homogeneidade de detritos dos fluxos artificialmente gerados nos ensaios in situ em contraste com a heterogeneidade dos fluxos de detritos brasileiros, os quais são marcados pela presença de blocos variando de pequenas a enormes dimensões e que influenciam a altura do fluxo.

Lamentavelmente não foi possível obter todos os valores das simulações feitas por VALVERDE (2016). As Tabelas 6.28 e 6.29 apresentam os valores de altura do fluxo de detritos fornecidos pelas simulações de VALVERDE (2016) e deste trabalho, respectivamente.

O maior valor de altura de fluxo obtido da simulação de VALVERDE (2016) é igual a 2,0m e corresponde ao fluxo Hospital São Lucas no início da zona de deposição. No caso das simulações feitas nesta pesquisa o maior valor é de 2,3m, também no início da zona de deposição do Hospital São Lucas.

A Tabela 6.30 resume os valores das diferenças percentuais encontradas nas comparações entre as alturas de fluxo, calculadas com diferentes programas e reologias. Em sua grande maioria as diferenças percentuais são inferiores a 100%.

Tabela 6.28. Valores de altura máxima dos fluxos de detritos de VALVERDE (2016).

DAN3D - Reologia de Voellmy				DAN-W - Reologia de Voellmy			
Distância da zona de iniciação (m)	Altura máxima fluxo (m)			Distância da zona de iniciação (m)	Altura máxima fluxo (m)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas		Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	0,4	0,4	0,4	100	0,4	0,3	0,4
300	0,2	0,2	0,2	300	0,2	0,2	0,3
400	0,2	0,2	0,8	400	0,2	0,2	0,8
425	0,4	0,4	0,5	425			
450	0,4	0,4	0,7	450			
475	0,4	0,4	0,8	475			
500	0,2	0,3	1,2	500	0,3	0,3	1,5
525	0,4	0,4	1,0	525			
550	0,5	0,5	0,9	550			
575	0,5	0,5	0,9	575			
600	0,2	0,5	0,5	600	0,2	0,6	0,3
625	0,7	0,5	0,7	625			
650	0,9	0,5	1,0	650			
675	0,8	0,5	1,0	675			
700	0,7	0,5	1,0	700	0,6	0,5	1,0
725	0,7	0,5	1,2	725			
750	0,7		1,50	750			
775	0,6		1,72	775			
800	0,6		2,00	800	0,8		1,5

Tabela 6.29. Valores de altura máxima dos fluxos de detritos desta pesquisa.

DAN-W - Reologia de Atrito			
Distância da zona de iniciação (m)	Altura máxima fluxo (m)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	0,4	0,2	0,4
300	0,9	2,1	1,5
400	1,0	0,9	2,3
425	1,1	0,7	2,1
450	1,0	0,6	2,0
475	1,0	0,5	2,0
500	0,8	0,4	1,9
525	0,9	0,4	1,7
550	0,7	0,4	1,4
575	0,7	0,5	1,2
600	0,8	0,5	1,1
625	0,8	0,6	0,6
650	0,7	0,7	0,8
675	0,5	0,7	0,7
700	0,3	0,5	0,7
725	0,2	0,3	0,6
750			0,5
775			0,7
800			0,8

Tabela 6.30. Diferenças percentuais da altura do fluxo do Morro Das Pedras.

Distância da zona de iniciação (m)	DAN3D Voellmy - DANW		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	-8	-29	20
300	-35	-32	25
400	-12	-25	5
500	50	20	22
600	25	22	-33
700	-14	-4	-5
800	33		-25

Distância da zona de iniciação (m)	DANW Voellmy - DANW Atrito		
	Córrego D'Antas	Córrego D'Antas	Hospital São Lucas
100	-12	14	5
300	-83	-93	-83
400	-86	-84	-64
500	-63	-30	-21
600	-76	25	-72
700	100	-8	46
800			81

Distância da zona de iniciação (m)	DAN3D Voellmy - DANW Atrito		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	5	-37	14
300	283	864	645
400	512	365	190
425	163	85	324
450	150	40	190
475	138	15	144
500	305	72	54
525	118	-3	66
550	48	-22	60
575	46	-8	37
600	419	-2	136
625	20	20	-14
650	-22	32	-19
675	-28	40	-28
700	-57	4	-35
725	-76	-48	-52
750			-65
775			-61
800			-59

Número de Froude

Vários autores reportam a importância do Número de Froude na avaliação de fluxo de detritos. O tipo de fluxo é relacionado diretamente ao Número de Froude: Crítico quando igual a 1, torrencial quando maior que 1,0 e fluvial quando menor que 1 conforme indicado na Tabela 6.31. Nesta tabela são usadas 3 cores para a classificação do tipo de fluxo. O mesmo código de cores é empregado para a avaliação dos tipos de fluxos em função dos Números de Froude, calculados segundo as distintas reologias e programas com dados das simulações de VALVERDE (2016) e desta pesquisa, e apresentados respectivamente nas Tabelas 6.32 e 6.33.

Note-se que o Número de Froude é função da velocidade e altura do fluxo. Desta forma, considerando que a determinação da altura por meio dos programas não é precisa e, muitas vezes, representativa da real altura de fluxo de detritos, acredita-se que os resultados dos números de Froude possam ser inadequados e exigem uma interpretação cuidadosa.

Tabela 6.31. Tipo de fluxo relacionado com o número de Froude.

Tipo de Fluxo		Número de Froude
Crítico		1
Torrencial		>1
Fluvial		<1

Tabela 6.32. Número de Froude e tipo de fluxo das simulações de VALVERDE (2016).

DAN3D - Reologia de Voellmy				DAN-W - Reologia de Voellmy			
Distância da zona de iniciação (m)	NUMERO DE FROUDE			Distância da zona de iniciação (m)	NUMERO DE FROUDE		
	Corrego D'Antas Zona 1	Corrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas		Corrego D'Antas Zona 1	Corrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	5.3	5.6	5.1	100	5.2	4.2	5.7
300	3.7	3.3	5.2	300	2.6	2.0	5.6
400	3.3	4.4	1.8	400	2.9	4.5	2.0
425	2.2	3.2	2.2	425			
450	2.2	2.9	1.8	450			
475	2.2	2.8	1.5	475			
500	3.2	3.6	1.1	500	2.8	4.7	1.0
525	2.3	2.4	1.2	525			
550	1.9	1.7	1.3	550			
575	1.6	1.5	1.2	575			
600	2.0	1.6	1.8	600	2.5	1.9	1.0
625	1.0	1.0	1.6	625			
650	0.9	0.8	1.6	650			
675	1.0	0.9	1.7	675			
700	1.0	0.7	1.7	700	1.7		0.6
725	1.0	0.4	1.3	725			
750	0.8		0.9	750			
775	0.5		0.8	775			
800	0.3		0.7	800	0.3		0.4

Tabela 6.33. Número de Froude e tipo de fluxo das simulações dos fluxos de detritos do morro Duas Pedras desta pesquisa.

DAN-W - Reologia de Atrito			
Distância da zona de iniciação (m)	NUMERO DE FROUDE		
	Córrego D`Antas Zona 1	Córrego D`Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	6,1	10,9	10,3
300	5,4	3,5	7,0
400	4,8	4,8	4,2
425	4,9	5,7	4,3
450	5,1	7,4	4,3
475	5,2	9,4	4,3
500	5,5	10,0	4,2
525	5,3	10,5	4,3
550	5,3	10,3	4,4
575	5,0	9,1	4,6
600	4,2	8,1	4,8
625	3,7	6,5	6,5
650	3,4	5,4	5,3
675	3,3	4,4	5,5
700	2,9	3,8	5,7
725	2,3	2,8	6,0
750			6,2
775			5,3
800			4,3

Analisando as Tabelas 6.32 e 6.33, é possível notar que o Número de Froude superior a 1 domina nas trajetórias dos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras, indicando a ocorrência de fluxo torrencial. Especialmente, os valores são sempre superiores a 1 nas simulações com reologia de atrito realizadas com o DAN-W. No caso das simulações com a reologia de Voellmy, independente do programa usado para a modelagem, o fluxo é torrencial na zona de iniciação, zona de transporte e no começo da zona de deposição, Somente ao final da zona de deposição, os valores de Froude são iguais e inferiores a 1, indicando a ocorrência de fluxo crítico e fluvial, respectivamente.

Energia de impacto

A determinação da energia de impacto exige o conhecimento da velocidade do fluxo e a massa envolvida no impacto. Nesta pesquisa foram avaliados 4 métodos de simulações numéricos para a obtenção da velocidade, destacando-se aquele que calcula com

programa DAN-3D e reologia de Voellmy, o qual oferece a melhor representação dos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras.

Em relação à energia do fluxo de detritos, adotou-se a abordagem tradicional da energia cinética relacionada com a massa envolvida no fluxo de detritos e o volume que impacta uma estrutura de barreira para a realização de novas análises. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.34, 6.35 e 6.36, correspondentes aos valores de energia de impacto calculados para Córrego D'Antas Zona 1, Córrego D'Antas Zona 2 e Hospital São Lucas. As Figura 6.10 a 6.12 ilustram os resultados destas análises da variação da energia ao longo da trajetória.

Observa-se das tabelas e figuras que, independentemente do fluxo de detritos, a variação da energia ao longo da trajetória é elevada e com valores muito diferentes em função do programa de cálculo. Entretanto, os resultados passam a ser consistentes entre si a partir da zona de deposição. As diferenças percentuais são consideradas aceitáveis a partir de 300 m de distância. Esta conclusão é importante para o projeto de estruturas de proteção contra fluxos de detritos, pois pode auxiliar na determinação dos esforços de impacto sobre a estrutura, na área mais recomendada para a sua instalação, correspondente à zona de deposição.

Por exemplo, uma barreira rígida ou flexível de impacto com capacidade de 3000kJoules pode ser recomendada a partir de 500 m da distância percorrida. Lembre-se que para este cálculo foi adotada a abordagem tradicional da energia cinética, a qual conduz a valores maiores do que os reais e, portanto, a favor da segurança.

O fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 1 (Tabela 6.34 e Figura 6.10), nota-se uma variação elevada e em sentido contrário da energia no início do movimento até cerca de 300m. Este comportamento não é observado para o fluxo de detritos Córrego D'Antas Zona 2 (Tabela 6.35 e Figura 6.11). Para ambos, a partir da distância de 500 m os resultados apresentam uma boa consistência entre si, reduzindo a energia com o aumento da distância na zona de deposição. As diferenças percentuais são consideradas aceitáveis e se encontram dentro da ordem de grandeza esperada. Pode-se recomendar uma barreira de 3000kJ a partir de 550m de distância, sendo capaz de resistir ao impacto dos fluxos de detritos.

Tabela 6.34. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 1.

Distância	VELOCIDADES (m/s)	ENERGIA (Kjoules)		Diferenças percentuais
	DAN 3D	DAN 3D	RocFall	DAN3D / ROCFALL
100	10,5	6101	1571	-74
300	5,5	3450	3911	13
400	4,3	3312	1908	-42
425	4,3	3312	2712	-18
450	4,3	3312	3114	-6
475	4,4	3468	3918	13
500	4,5	3627	4320	19
525	4,6	4752	1902	-60
550	4,2	3965	1678	-58
575	3,5	2754	1538	-44
600	2,5	1405	1606	14
625	2,6	1520	1640	8
650	2,7	1639	1708	4
675	2,7	1637	1742	6
700	2,6	1518	1810	19
725	2,6	1518	1844	21
750	2	898	1912	113
775	1,3	380	1946	412
800	0,8	272	370	36

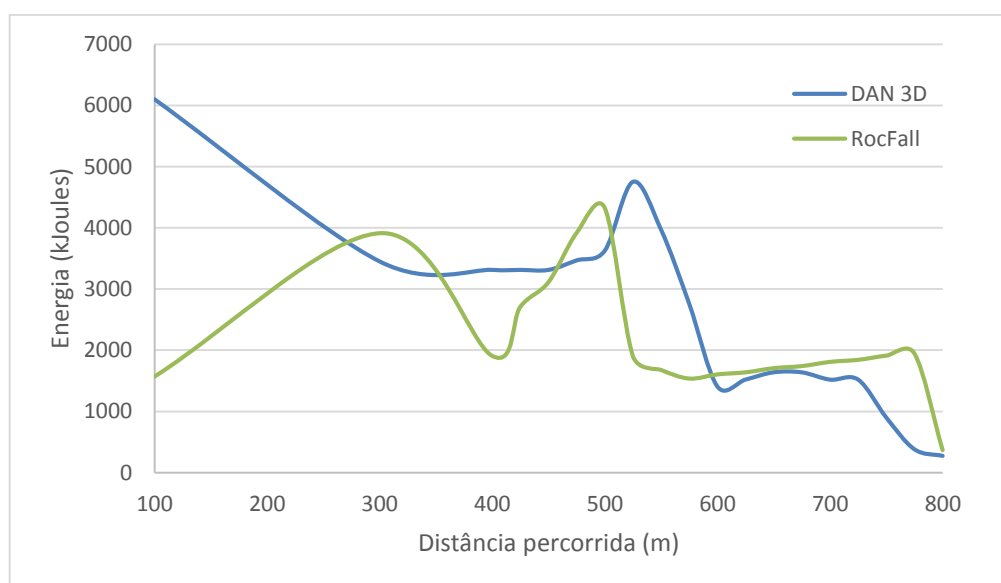


Figura 6.10. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 1.

Tabela 6.35. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 2.

Distância	VELOCIDADES (m/s)	ENERGIA (Kjoules)		Diferenças percentuais
	DAN 3D	DAN 3D	RocFall	DAN3D / ROCFALL
100	10,4	4396	2066	-53
300	4,8	4093	1448	-65
400	6,1	7804	2647	-66
425	6,3	5030	1808	-64
450	5,8	4256	2433	-43
475	5,6	3968	4054	2
500	5,7	4111	4875	19
525	4,8	2920	4182	43
550	3,8	2863	2090	-27
575	3,4	2292	2666	16
600	3,4	3122	940	-70
625	2,3	1601	792	-51
650	1,8	980	660	-33
675	1,9	1092	600	-45
700	1,5	681	563	-17
725	0,9	245	546	123
750	0,6	109	531	387
775	0	0	543	
800			0	

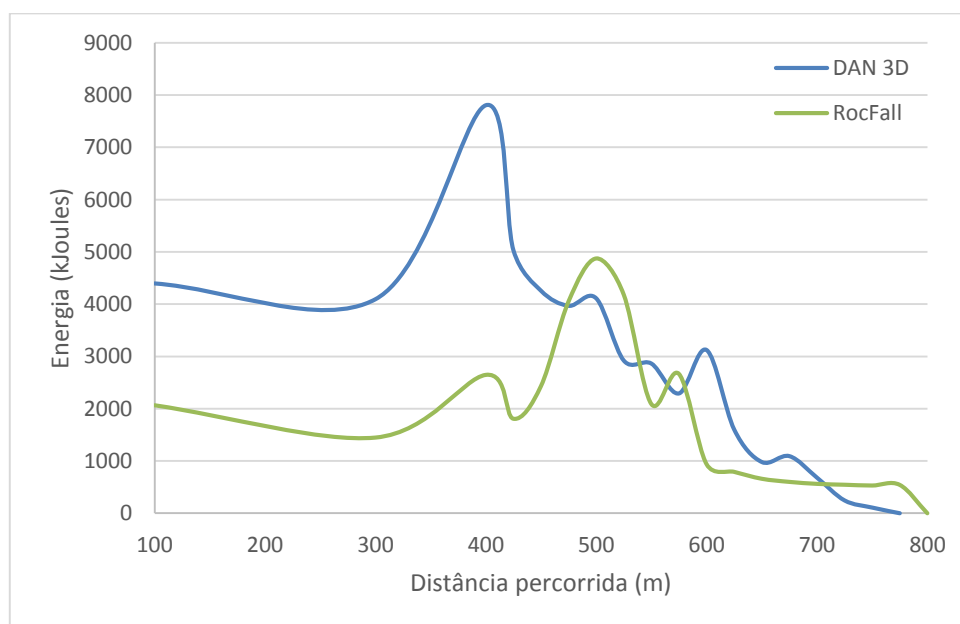


Figura 6.11. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Córrego D'Antas Zona 2.

Tabela 6.36. Valores de energia obtidos com DAN3D e Rocfall - Hospital São Lucas.

Distância	VELOCIDADES (m/s)	ENERGIA (Kjoules)		Diferenças percentuais
	DAN 3D	DAN 3D	RocFall	DAN3D / ROCFALL
100	9,5	7744	3080	-60
300	7,3	4724	6329	34
400	5,1	4742	2104	-56
425	4,8	5642	2451	-57
450	4,8	5642	2978	-47
475	4,2	4320	2238	-48
500	3,7	3353	2432	-27
525	3,9	3725	3179	-15
550	4	5658	1276	-77
575	3,5	6375	749	-88
600	3,8	2672	685	-74
625	4,2	3264	913	-72
650	5	4626	1473	-68
675	5,3	5710	1753	-69
700	5,3	5710	2033	-64
725	4,4	3935	2593	-34
750	3,5	2267	1515	-33
775	3,3	2015	1688	-16
800	2,9	1556	1859	19
825	0	0	376	
850	0	0	0	

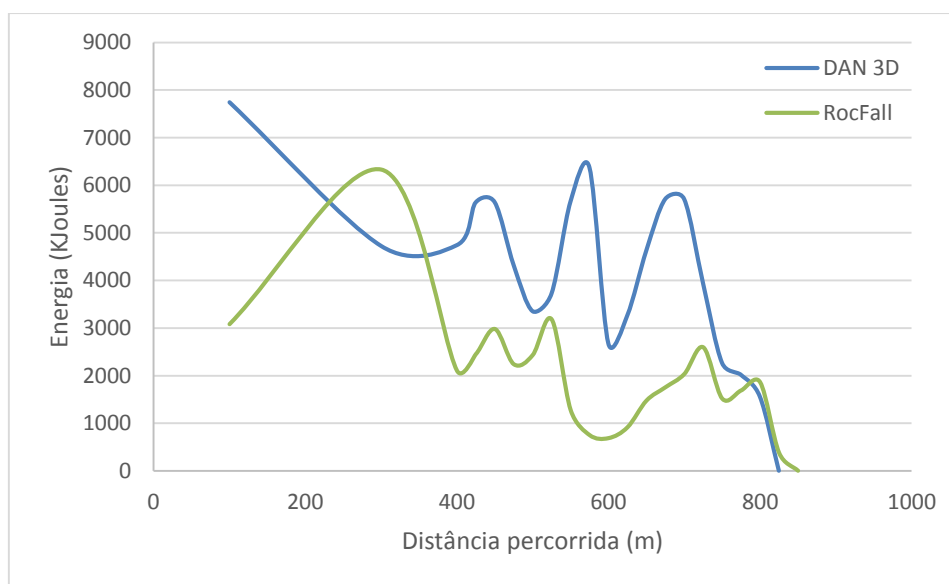


Figura 6.22. Variação da energia de impacto com a distância percorrida obtidas com DAN3D e Rocfall - Hospital São Lucas.

No caso do fluxo de detritos Hospital São Lucas a abordagem da energia cinética fornece valores muito elevados quando comparados aos da energia calculada com o programa RocFall, conforme apresentado na Tabela 6.36 e Figura 6.12. Isto se deve possivelmente a elevada massa do fluxo de detritos. Também corrobora a conclusão de WENDELER et al. (2007), que reportam valores mais altos quando assumida a abordagem da energia cinética tradicional.

Pressão de Impacto

A pressão de impacto de fluxos de detritos pode ser estimada por diversos modelos da literatura. O autor acredita que o mais adequado é o modelo hidrodinâmico com um fator de impacto empírico de 3, igual ao proposto por LO (2000) no relatório emitido pelo *Geotechnical Engineering Office* de Hong Kong e com massa específica do fluxo de 2000 kg/m³.

Tendo em vista a presença de grandes blocos de rocha nos fluxos de detritos do Morro Duas Pedras, resolveu-se também avaliar a abordagem recomendada com o método de queda de blocos proposto por MIZUYAMA (1978).

Para comparação das abordagens, considerou-se a queda de um bloco com volume de 6m³ e uma massa específica de 2700kg/m³. A área de impacto foi selecionada como uma barreira dinâmica de impacto de 3000 kJoules, com altura residual de 3,3m.

A Tabela 6.34 apresenta as diferenças percentuais entre os valores de pressão de impacto determinados com as abordagens de queda de bloco e fluxo de detritos. Nota-se que os valores são consistentes, pois as diferenças percentuais são em sua maioria reduzidas e inferiores a 50%. As Figuras 6.13 a 6.15 mostram a variação da energia de impacto em função da distância percorridas pelos 3 fluxos de detritos, do Córrego D'Antas – Zona 1, do Córrego D'Antas – Zona 2 e Hospital São Lucas, indicando boa concordância de resultados nos 3 casos. Pode-se concluir que a seleção de um bloco de 6 m³ com massa específica de 2700 kg/m³ representa um fluxo de detritos equivalente para estimativa das pressões de impacto dos fluxos reais ocorridos no Morro Duas Pedras.

Tabela 6.37. Diferenças percentuais entre pressão de impacto obtidas das abordagens de queda de bloco e fluxo de detritos.

DIFERENÇAS PERCENTUAIS			
Distância da zona de iniciação (m)	Pressão de impacto (kPa)		
	Córrego D'Antas Zona 1	Córrego D'Antas Zona 2	Hospital São Lucas
100	-53,8	-53,5	-50,0
300	-22,6	-13,7	-38,3
400	-5,7	-28,7	-17,8
425	-5,7	-30,5	-13,7
450	-5,7	-25,8	-13,7
475	-7,4	-23,7	-3,9
500	-9,1	-24,8	6,3
525	-10,7	-13,7	1,9
550	-3,9	4,1	-0,1
575	11,2	13,8	11,2
600	45,5	13,8	4,1
625	41,0	55,5	-3,9
650	36,8	89,2	-16,4
675	36,8	81,2	-20,2
700	41,0	118,9	-20,2
725	41,0	229,5	-7,4
750	73,9	355,7	11,2
775	145,5		16,5
800	262,0		29,2

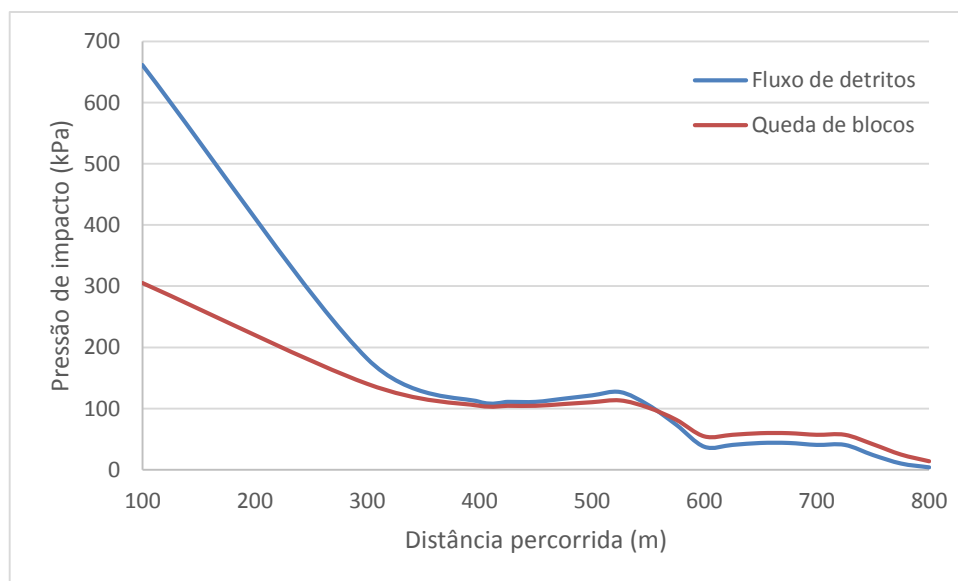


Figura 6.33. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Córrego D'Antas – Zona 1.

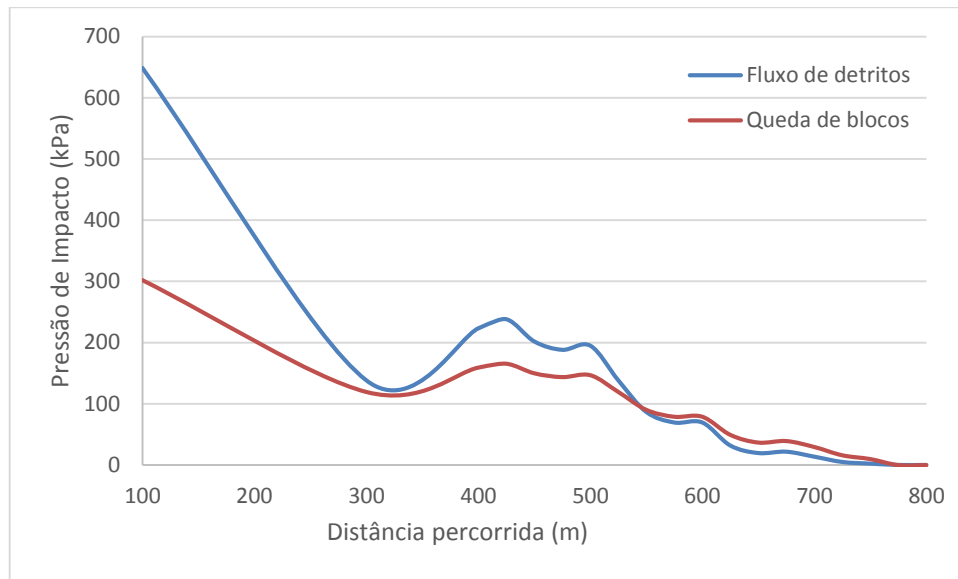


Figura 6.44. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Córrego D'Antas – Zona 2.

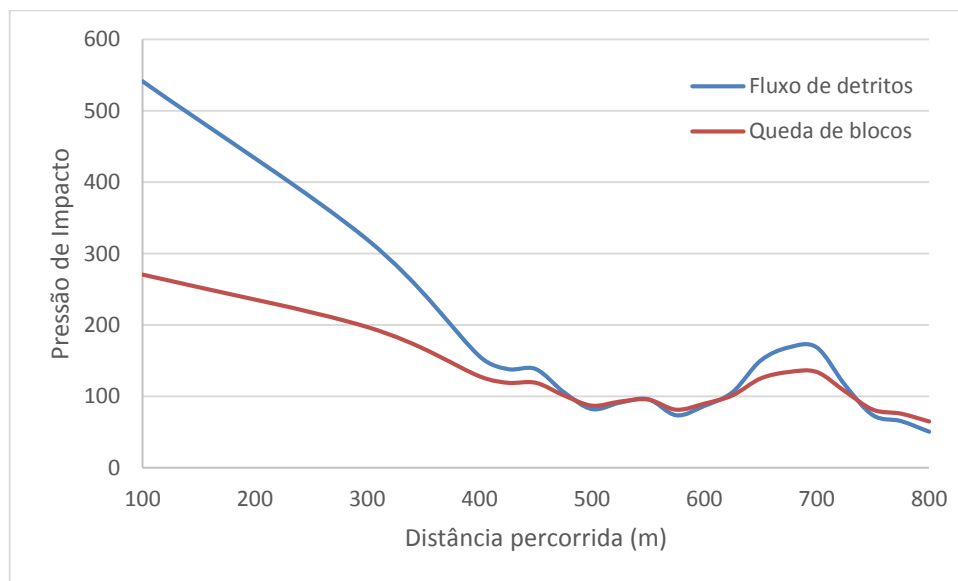


Figura 6.55. Variação da pressão de impacto com a distância percorrida em função da abordagem de queda de bloco e fluxo de detritos - Hospital São Lucas.

6.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta os resultados das análises realizadas com os diferentes programas computacionais, além das análises dos diferentes modelos de fluxos de detritos e queda de blocos.

Da avaliação dos diferentes modelos, recomenda-se usar os modelos hidráulicos hidrodinâmicos para avaliar os fluxos de detritos. O fator empírico e a velocidade do fluxo são os parâmetros complexos de difícil determinação e que podem afetar expressivamente as pressões de impacto estimadas.

Sugere-se usar um fator de impacto entre 2 e 3, conforme proposto nos estudos de *Geotechnical Engineering Office* de Hong Kong e comprovado com os resultados dos ensaios de fluxos de detritos realizadas em campo, Veltheim e Pieve di Alpago, e também subsidiado pelas análises de resultados de pressão de impacto estimada para fluxos de detritos e para queda de bloco.

Acredita-se que a modelagem do fluxo de detritos realizada por meio do programa DAN3D com a reologia de voellmy é a mais adequada para a determinação da velocidade do fluxo a ser usada para a estimativa das pressões de impacto dos fluxos de detritos no Morro Duas Pedras.

A altura do fluxo e o Número de Froude são parâmetros difíceis de serem estimados para os fluxos de detritos ocorridos no Morro Duas Pedras e, possivelmente no Brasil, devido a sua especial geomorfologia e geologia quando comparadas aos movimentos de massa de outros países. Portanto, não se recomenda o emprego de modelos hidrostáticos para estimar a pressão de impacto nos fluxos de detritos com características semelhantes aos analisados no Morro Duas Pedras.

A energia de impacto e pressão de impacto fornecida e inferida com o programa RocFall são consideradas válidas para projetar as estruturas de impacto contra os fluxos de detritos. Embora, cuidados especiais devem ser tomados em relação à seleção ao volume do bloco representativo dos movimentos de massa na área analisada.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. CONCLUSÕES

O objetivo deste capítulo é apresentar as conclusões do trabalho realizado e as recomendações para futuras pesquisas relacionadas com os fluxos de detritos e os esforços de impacto.

O grupo de pesquisa sobre fluxos de detritos da COPPE-UFRJ / PUC-Rio, *Grupo Debris Flow*, tem investigado este movimento de massa em vários outros trabalhos de pesquisa. Foi possível desenvolver uma base sólida de dados e conceitos sobre os fluxos de detritos, especialmente, aqueles ocorridos no Brasil. O grupo também conseguiu montar um banco de dados com informações de fluxos de detritos nacionais e internacionais, com cerca de 270 eventos. Relações empíricas para determinação de parâmetros têm sido propostas em função das características dos eventos de fluxos brasileiros. Em adição, o grupo tem realizado simulações numéricas bi e tridimensionais para a modelagem deste tipo de movimento catastrófico.

Esta pesquisa foi desenvolvida segundo as diretrizes principais do Grupo *Debris Flow* de se aumentar o conhecimento do movimento e ampliar as técnicas de caracterização e determinação de parâmetros. Especificamente, este trabalho procurou avaliar métodos e modelos capazes de fornecerem esforços de impacto de fluxo de detritos. A determinação de forças, pressões e energias de impacto é essencial para o adequado dimensionamento de estruturas de proteção ou de convivência com *debris flows*. Para tanto, uma extensa investigação da literatura técnica nacional e internacional foi realizada para a seleção de métodos e modelos de esforços de impacto, os quais foram analisados e comparados. Os eventos de fluxos de detritos no Morro Duas Pedras, em Nova Friburgo, RJ foram adotados como casos de referência nesta pesquisa. Considerou-se também as informações e resultados de fluxos de detritos em campos experimentais na Itália e Suíça.

O desenvolvimento da pesquisa levou a uma maior compreensão dos eventos de fluxos de detritos e permitiu estabelecer algumas considerações e conclusões importantes, resumidas em:

1. A literatura oferece diversas propostas para a determinação da pressão de impacto de fluxos de detritos, dentre as quais os modelos hidráulicos são os usados para dimensionamento de estruturas de proteção;
2. Os modelos hidráulicos hidrodinâmicos para estimativa da pressão de impacto fornecem os melhores resultados quando comparados com outros modelos.
3. Os modelos hidráulicos hidrostáticos apresentam resultados consistentes somente para fluxos de detritos de velocidades muito reduzidas e com altura elevada;
4. Os programas computacionais DAN-W e DAN3D conseguem simular fluxos de detritos e as principais reologias adotadas são de Voellmy e de atrito;
5. As simulações de fluxos de detritos com os programas DAN-W e DAN3D fornecem resultados consistentes de parâmetros como distância percorrida, volume final, área de deposição, independentemente da reologia de atrito ou Voellmy;
6. As simulações com os programas DAN-W e DAN3D não fornecem resultados consistentes de altura dos fluxos de detritos ocorridos no Morro Das Pedras, devido à impossibilidade de considerar blocos de rocha de grandes dimensões no fluxo equivalente adotado para processamento do movimento;
7. A determinação do Número de Froude por meio de simulações com os programas DAN-W e DAN3D não é recomendada para fluxos de detritos com grandes blocos de rocha, devido à pouca representatividade do parâmetro, visto que é função da velocidade e a altura do fluxo;
8. O programa DAN-W usando reologia de Voellmy conseguiu representar os fluxos de detritos dos ensaios de campo de Pieve di Alpago e Veltheim, fornecendo valores representativos de altura e velocidade do fluxo;
9. O modelo hidráulico hidrodinâmico com fator de impacto de 3,0 forneceu valores de pressão de impacto consistentes para os fluxos de detritos dos ensaios in situ de Pieve di Alpago e Veltheim;

10. O emprego do programa RocFall, desenvolvido para quedas de blocos, forneceu valores consistentes de energia para os fluxos de detritos do Morro Duas Pedras;

11. O programa RocFall, desenvolvido para quedas de blocos, pode ser usado para a determinação da energia de impacto de fluxos de detritos com blocos de rochas de grandes dimensões, desde que a massa envolvida no movimento seja adequadamente representada;

12. O modelo de pressão de impacto para quedas de blocos pode ser usado para simular os movimentos de massas do tipo fluxos de detritos sempre e quando se tenha um conhecimento profundo da região envolvida, tais como movimentos de massa anteriores, geologia, geomorfologia, tamanho de blocos envolvidos nos outros acontecimentos.

Conclui-se finalmente que, A estimativa da energia e/ou pressão de impacto de fluxos de detritos é extremamente difícil devido à complexidade do movimento e avaliação dos seus parâmetros básicos. Por outro lado, os esforços de impacto são essenciais para o dimensionamento de estruturas de proteção contra fluxos de detritos, tais como barreiras rígidas e flexíveis.

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou um maior entendimento do problema e das ferramentas existentes para a determinação dos esforços de impacto de fluxo de detritos. Desta forma, elaborou-se um conjunto de recomendações para a estimativa dos esforços de impacto de fluxos de detritos, com a finalidade de auxiliar o projeto das estruturas de proteção. São elas:

1. Levantamento das características da área de ocorrência de fluxo de detritos, com ênfase nos tipos de materiais presentes no canal ou superfície da encosta;

2. Seleção do programa numérico DAN3D ou DAN-W com reologias de atrito ou Voellmy. Ambas reologias representaram adequadamente os fluxos de detritos do Morro Duas Pedras, sendo a de Voellmy a de maior aderência de resultados. No caso de reconhecimento detalhado da área e de eventos de fluxos de detritos já ocorridos, recomenda-se o uso do programa DAN3D, que fornece valores mais consistentes de velocidade do fluxo;

3. Para fluxos de detritos com velocidades muito baixas, recomenda-se o uso do modelo hidráulico hidrostático. Para fluxos de detritos com velocidades altas, recomenda-se usar os modelos hidráulicos hidrodinâmicos, especificamente o proposto por JWAN (2012) com fator de impacto entre 2 e 3.
4. Para estimativa da energia de impacto, recomenda-se fazer uma comparação entre a abordagem tradicional da energia cinética e a energia calculada pelo programa Rocfall.

7.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

As análises desenvolvidas mostram que a determinação de esforços de impacto de fluxos de detritos não é um tema concluído, muito pelo contrário. Novas pesquisas devem ser implementadas, visando ampliar o conhecimento de métodos e modelos que possam ser empregados para a estimativas dos esforços e dimensionamento de estruturas de proteção contra fluxos de detritos. Algumas sugestões são enumeradas:

1. Realização de modelagens numéricas com o programa DAN3D e DANW de maior número de fluxos de detritos para verificação de desempenho da simulação deste tipo de movimento;
2. Aplicação do modelo de KWAN (2012) a outros fluxos de detritos com registros e/ou estimativas de esforços de impacto em barreiras;
3. Realização de análises de sensibilidade dos fatores de impacto de fluxo de detritos e avaliação da sua influência no dimensionamento de estruturas de proteção;
4. Aplicação da abordagem de estimativa de energia de impacto por meio do programa Rocfall a novos casos de fluxos de detritos para avaliação da sua representatividade de eventos reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AULITZKY, H. (1989) “The debris flow of Austria”, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, vol. 40, Issue 1, pp. 5-13.

ARATTANO, M. & FRANZI, L. (2003) On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. Natural Hazards and Earth System Sciences 3: pp. 539-544.

ARMANINI, A., LARCHER, M., ODORIZZI, M. (2011) Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall, Ital. J. of Eng. Geol. and Env., pp. 1041-1049, .

ARMANINI A; SCOTTON P (1992) “Experimental analysis on the dynamic impact of a debris flow on structures”. In: International symposium interpraevent 1992, vol 6, Bern, pp. 107–116.

ARMANINI A (1997) “On the dynamic impact of debris flows”. In: Armanini A, Masanori M (eds) Recent developments on debris flows, lecture notes in earth sciences, Springer, Berlin, pp. 208–226.

AUGUSTO FILHO, O. (1992) “Caracterização Geológico-Geotécnica voltada a Estabilização de Encostas: Uma Proposta Metodológica”, Conf. Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1ª COBRAE, Rio de Janeiro, ABMS/ABGE, V. 2, pp. 721-733.

AUSTRALIAN GEOMECHANICS (2002) Journal and News of the Australian Geomechanics Society, Vol. 37, No. 3, June 2002: pp. 106-108.

BATES, R. L.; JACKSON, J. A. (1984) Glossary of geology. American Geological Institute. Falls Church, Virginia, p. 788.

BERTI, M.; SIMONI, A (2007) “Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships”. Geomorphology, v. 90, pp. 144–161.

BHUWANI, P. P. (2004) "Landslide Gravitative Debris Flow in Natural terrain", Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, 188p.

- BLACKWELDER, E. (1928) "Mudflow as a geological agent in semi-arid mountains", Geological Society of America, Bulletin, 39, pp. 465-484.
- BOVIS, M.J.; DAGG, B.R. (1992) "Debris flow triggering by impulsive loading: mechanical modeling and case studies", Canadian Geotech. J., v.29, pp.345-352.
- BUGNION, L; MCARDELL, B; BARTELT, P; WENDELER, C. (2011) "Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles". Landslides, pp 1–9.
- BULL, W. B. (1964) "Alluvial Fans and Near-surface Subsidence in Western Fresno County, California (USGS Professional Paper 437-A) US Geological Survey, Reston VA.
- BURGER, R.L. (1984) "The Prehistoric Occupation of Chavín de Huánta, Perú". In: Anthropology Series, n. 14, University of California Press, Berkeley. pp. 403.
- CANELLI L, FERRERO AM, MIGLIAZZA M, SEGALIN A (2012) Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers— experimental tests and impact analysis. Nat Hazards Earth Syst Sci 12:pp. 1693–1699.
- COROMINAS, J. (1996) "The angle of reach as a mobility index for small and large landslides", Canadian Geotechnical Journal, vol. 33, pp. 260-271.
- COSTA, J. E. (1984) "Physical Geomorphology of debris flows", 25p.
- CRANDELL, D. R (1957) Some features of mudflow deposits (Abstract). Bulletin of the Geological Society of America, 68, pp. 18-21.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996) "Landslides Types and Processes", Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, Washington, USA, p. 36-75.
- CRUDEN, D. M. (1991) A simple definition of landslide. International Association of Engineering Geology. Paris, pp. 27-29.
- CRUDEN, D. M. (2003) The first classification of landslides? Environmental & Engineering Geoscience, v. IX, n. 3, pp. 197-200.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. (1996) Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. Landslides investigation and mitigation. Washington, DC: Transportation research board, 1996. Cap. 3, pp. 36-75.

- CUI, P; ZENG, C; LEI, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, pp. 1644-1655.
- CUNDALL, P.; STRACK O. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29 (1979) 47-65.
- DAIDO, A. (1993) “Impact Force of Mud Debris Flows on Structures”, *Proceedings of XXV IAHR Congress, Tokyo (Tech. Sess. B, III)*, pp. 211–218.
- DANA, J. D. (1876) *Manual of Geology*. New York: Ivison, Blakeman, Taylor, 1876.
- DE NATALE, J. S. et al (1996) Response of the Geobrugg cable net system to debris flow loading. Report. California Polytechnic State University.
- DE NATALE, J. S.; IVERSON, R. M.; MAJOR, J.J.; LAHUSEN, R. G.; FIEGEL, G. L.; DUFFY, J.D. (1999) Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flows. USGS Open-File Report 99- 205, US Geological Survey.
- DEWOLFE, V. G (2008) Effective mitigation of debris flows at Lemon Dam, La Pata County, Colorado. *Geomorphology*, v. 96, n. 3-4, p. 366-377.
- DU, R., KANG, Z. AND ZHANG, S. (1986) On the classification of debris flow in China, *Collected Papers of the Third International Symposium on River Sedimentation*, The University of Mississippi, U.S.A., pp. 1286-1291.
- ECKERSLEY, D. (1990) “Instrumented laboratory flowslides”, *Géotechnique*, v. 40, n. 3, pp. 489-502.
- GEOMECAÂNICA (2011) “Estudo de Detalhes – Descrição dos Pontos do Bairro Córrego D’Antas”, *Relatório Técnico*, 82p.
- GIANI, G. P. (1992) “Rock slope stability analisys”, Balkeman, Rotterdam.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1983) “Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação”, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 194p.
- HE, S; LIU, W; LI, X. (2016) Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles. *Environmental Earth Science* (2016) 75:298. Pp 8.

- HEIM, A. (1989) Bergsturz und Menschenleben (Landslides and Human Lives). Translated by N. Skermer. Bitech Press, Vancouver, 1989.
- HU K.; WEI, F.; LI, Y. (2011) Real-time measurement and preliminary analysis of debrisflow impact force at jiangjia ravine, china. *Earth Surf Process Landf* 36:1268–1278.
- HUANG, H; YANG, K; LAI, S. (2007) Impact force of debris flow on filter dam. *Geophysical Research Abstracts* Vol 9, 03218, 2007. Pp 32.
- HÜBL, J.; HOLZINGER, G. (2003) Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Kleinmassstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern. WLS Report 50 Band 3, Institut of Mountain Risk Engineering.
- HÜBL J.; SUDA, J.; PROSKE, D.; KAITNA, R; SCHEIDL, C. (2009) Debris flow impact estimation. In: Popovska C, Jovanovski M (eds) Eleventh international symposium on water management and hydraulic Engineering, vol 1, pp 137–148.
- HUEBL, J.; FIEBIGER, G. (2005) Debris-flow mitigation measures. In: JAKOB, M.; OLDRICH, H. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin, Heidelberg: Praxis-Springer, 2005. Cap. 18, p. 445-487.
- HUNGR, O., MORGAN, G.C., KELLERHALS, R. (1984) Quantitative analysis of debris flow torrent hazards for design of remedial measures. *Can Geotech J* 21:663–677.
- HUNGR, O. (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 32, p. 610-623, 1995.
- HUNGR, O.; EVANS, S.G.; BOVIS, M.J.; HUTCHINSON, J.N. (2001) A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, v. VII, n. 3, p. 221-238, 2001.
- HUNGR, O. (2005) Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. Debris flow Hazards and Related Phenomena. [S.l.]: Praxis-Springer, 2005. p. 47-61.
- HUNGR, O.; MCDUGALL, S. (2009) Two numerical models for landslide dynamic analysis. *Computers & Geosciences*, n. 35, p. 978-992.

HUNGR, O.; MCDOUGALL, S.; BOVIS, M. (2005) Entrainment of material by debris flows. In: JAKOB, M.; OLDRICH, H. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. [S.l.]: Springer-Praxis, 2005. Cap. 7, p. 135-158.

HUTCHINSON, J. N. (1988) "Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology", General Report, Proceedings, 50^o International Symposium on Landslides, vol. 1, p. 3-35.

ISHIKAWA, N.; INOUE, R.; HAYASHI, K.; HASEGAWA, Y.; MIZUYAMA, T. (2008) Experimental approach on measurement of impulsive fluid force using debris flow model. In: Conference proceedings interpraevent 08.

IVERSON, R. M. (1997) The physics of debris flows. Review of Geophysics, v. 35, n. 3, p. 245-296.

JAKOB, M.; HUNGR, O. (2005) Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Heidelberg: Praxis-Springer.

KWAN, J.S.H. (2012) Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-Resisting Barriers. Geo Report 270. Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

KWAN, J.S.H.; CHAN, S.L.; CHEUK, J.C.Y.; KOO, R.C.H. (2014) A case study on an open hillside landslide impacting on a flexible rockfall barrier at Jordan Valley, Hong Kong. Landslides 11, pp. 1037-1050.

KUWABARA, G., KONO, K. (1987) Restitution coefficient in a collision between two spheres, JPN J Appl Phys. 26, pp. 1230-1233.

KÖNIG U (2006) Real scale debris flow tests in the Schesatobel-valley. Master's thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria.

KHERKHEULIDZE, I. (1967) Estimation of basic characteristics of mudflow („sel“). Proc. Int. Assoc. Sci. Hy-drol. Symp. Floods Comput.. Vol. II. Leningrad. pp. 940-948.

LANG, T. E.; MARTINELLI JR, M. (1979) Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow, Part 2: Avalanche modeling and parameter error evaluation. Journal of Glaciology, v. 22, n. 86, p. 117-126.

LIEN, H. P. (2002) Study on Treatments of Debris Flow, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture (COA), Taiwan.

LICHTENHAHN, C. (1973) Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. Kolloquium über Wildbach-sperren. Mitteilungen der Forstlichen Bundesanstalt Wien. Heft 102/1973, pp.91-127.

LO, D.O.K. (2000) Review of Natural Terrain Landslide Debris-resisting Barrier Design. Geo Report 104. Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

LUIS-FONSECA, R.; RAIMAT, C.; HURLIMANN, M.; ABANCO, C.; MOYA, J.; FERNANDEZ, J. (2011) "Debris-flow protection in recurrent areas of the Pyrenees. Experience of the VX systems from output results collected in the pioneer monitoring station in Spain" Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Casa Editrice Università La Sapienza. pp. 1063-1071.

MORIGUCHI, S., BORJA, R.I.; ASHIMA, A.; SAWADA, K. (2009) Estimating the impact force generated by granular flow on a rigid obstruction, Acta Geotechnica 4:84.

MIZUYAMA, T. (2008) Structural countermeasures for debris flow disasters. Int J Eros Control Eng 1(2): 38–43.

MIZUYAMA, T. (1979) "Evaluation of Impact of Debris Flow on Check Dams", Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 40–49.

MATUSUSHITA, T. (1999) Messages for the 21st. Century. Sabo Works and Its Achievements. pp 71. Sabo Publicity Centre. Tokyo.

MCDUGALL, S. (2006) A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain. PhD Thesis. ed. Vancouver, Canadá: The University of British Columbia.

MORLES, M. S. (2009) "Modelación de flujos de derrubios empleando el método SPH. Aplicación a casos reales". Teses doctora, universidad Politécnica de Madrid.

MOTTA, H. P. G. (2014) "Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros", Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 263p.

NETTLETON, I. M.; MARTIN, S.; HENCHER, S.; MOORE, R. (2005) “Debris flows types and mechanics”, Scottish Road Network Landslides Study, TRL Limited eScottish Executive Editores, Capítulo 4, p. 45-117.

NUNES, A.L.L.S.; SAYÃO, A.S.F.J. (2014) Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência, 14CNG – Congresso nacional de Geotecnia. Geotecnia nas infraestruturas, Covilhã, Portugal, pp. 83 – 123.

NUNES, A.L.L.S.; RIOS FILHO, M.G. (2009) Barreiras Flexíveis para Mitigação de Fluxo de Detritos, 5a Conf. Bras. Estabilidade de Encostas, ABMS, SP, 8p.

ORTIGÃO, J.A.R.; SAYÃO, A.S.F.J. (2004) Handbook of Slope Stabilisation, SpringerVerlag, 540p.

PELIZONI, A. B. (2014) “Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense”, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 153p.

PIERSON, T. C.; COSTA, J. E. (1987) A rheological classification of subaerial sedimentwater flows. In: Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation (Eds: 137 Costa, J. E. & Wieczorek, G. F.). Reviews in Engineering Geology Volume VII, 1-12. Boulder, CO: Geological Society of America.

POLANCO, L. S. E. (2010) “Correlações empíricas para fluxos de detritos”, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 110p.

PORTELLA, F. E.; SILVA, L. F. M.; RIOS FILHO, M. G.; PEREIRA, G. I. M. (2013) "O Evento no Córrego D'Antas" – Mapeamento Geológico – Geotécnico em Área de Difícil Acesso. p. 211–215.

RICKENMANN, D. (1999) Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, Netherlands, n. 19, p. 47-77.

SASSA, K.; WANG, G. H. (2005) Mechanism of landslide-triggered debris flows: Liquefaction phenomena due to the undrained loading of torrential deposits. In: JAKOB, M.; OLDRICH, H. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin Heidelberg: Praxis-Springer, 2005. Cap. 5, p. 81-104.

SASSA, K. (1985) “The mechanism of debris flow”, In: Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, S. Francisco, ISSMFE, pp. 1173–1176, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.

SASSA, K. (1989) “Geotechnical classification of landslides”, Landslide News, n.3, pp.21-24.

SCHEIDL, C.; CHIARI, M.; KAITNA, R.M.U.; LLEGGER, M.; KRAWTSCHUK, A.; ZIMMERMANN, T.; PROSKE, D. (2013) Analyzing debris flow impact models, based on a small scale modelling approach. *Surv Geophys* 34:121–140.

SCHEIDL, C.; RICKENMANN D. (2010) “Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans”. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, pp. 157–173.

SCOTTON, P.; DEGANUTTI, A. M. (1997) Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments, in Proceedings of the 1st ASCE International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, edited by C.-L. Chen, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va. pp. 777–786.

SEGALINI, A.; FERRERO, A.; MIGLIAZZA, M.; VAGNON, F. (2016) Applicazione di misure fotogrammetriche applicate per lo Studio di barriere para debris flow. Metodi di rilievo di pareti rocciose per il monitoraggio e la progettazione di interventi (Seminário). Politecnico di Torino, 53p.

SHARPE, C. F. S. (1938) “Landslides and related phenomena”, Columbia University Press, Nova York.

SKERMER, A. N.; VANDINE, F. D. (2005) “Debris flows in history”. In: M.Jakob and O. Hungr (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*, pp. 25-51. Praxis. Springer Berlin Heidelberg.

STEVENS, A; HRENYA, C. (2005) “Comparison of soft-sphere models to measurements of collision properties during normal impacts”. *Powder Technology* 154(2), pp.99-109.

STEVENS, W.D. (1998) *Rocfall: A Tool for Probabilistic Analysis. Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls*. Master Thesis of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.

STINY, J. (1910) Die Muren. Verlag der Wagner'schen. Universitäts-buchhandlung. Innsbruck. 1910.

SUN, H.W.; LAM, T.T.M.; TSUI, H.M. (2012) Design basis for standardised modules of landslide debris-resisting barriers. Geo Report 174. Geotechnical Engineering Office, HKSAR Government.

SUWA, H.; OKUDA, S. (1983) Deposition of debris flows on a fan surface, Mt. Yakedake, Japan. Zeitschrift für Geomorphologie NF Supplementband 46:79–101.

SUWA, H.; OKUNISHI, K.; SAKAI, M. (1993) “Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakedake, Japan”, In: Proc. of Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control, Yokohama, IAHS Publ. No. 217, pp. 239–247.

SWANSTON, D. N. (1974) Slope Stability Problems Associated with Timber Harvesting in Mountainous Regions of the Southwestern United States (Forest Service General Technical Report PNW-021). US Department of Agriculture, Washington, DC.

TAKAHASHI, T. (2006) Mechanisms of sediment runoff and countermeasures for sediment hazards, Kinmirai Sha: 420p (in Japanese).

TAKAHASHI, T. (2007) “Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures”, Taylor and Francis Group, Londres 448p.

TAKAHASHI, T. (1991) Debris flow. Balkema. Rotterdam, p. 165. 1991.

TAKAHASHI, T.; NAKAGAWA, H. (1992) Routing debris flows with particle segregation. Journal of Hydraulic Engineering, n. 118 (11), p. 1490-1507, 1992.

TERZAGHI, K. (1950) Mechanics of landslides. New York: Geological Society of America, 1950. p. 83-124.

THORNTON, C. (1997) Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres, J Appl. Mech 64 (1997) 383-386.

THURBER CONSULTANTS Ltd (1984). Debris Torrents: A review of mitigative measures. Report to ministry of transportation & highways , british Columbia, 32 p.

VAGNON, F; SEGALINI, A. (2016) Debris flow impact estimation on a rigid barrier. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2016-80. Pp 17.

VALVERDE SANCHO, A. M. (2016) “Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais”, Dissertação de Mestrado, Depto de Engenharia Civil, PUC-RIO, 146p.

VANDINE, D. F. (1996) “Debris flow control structures for forest engineering”, Ministry of Forests Research Program, Victoria, British Columbia, Canadá, 68 p.

VARNES, D. J. (1978) “Slope Movement Types and Process”, Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, USA, p. 11-33.

VARNES, D. J. (1958) “Landslides Types and Process”, in Landslides and Engineering Practice: Nacional Research Council, Highway Research Board Special Report 29, USA, p. 20-47.

VOLKWEIN, A. (2011) Full-scale Testing and Dimensioning of Flexible Debris Flow Barriers. WSL. Birmensdorf. 2011.

XAVIER SILVA, J. (2015) “Análise numérica 3D do fluxo de detritos do Córrego D’Antas”, Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/COPPE, 151p.

WU, J., TIAN, L., KANG, Z., ZHANG, Y. & LIU, J. (1993) Debris flow and its comprehensive control. Science Press, 332 p.

WALTON, O., BRAUN, R. (1986) Viscosity granular – temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. J Rheol. 30 (1986) 949-980.

WATANABE, M.; IKEYA, H. (1981) Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima. Japan. Erosion sediment transport measurement. International Association on Hydrology, Florence. Science Publication 133/1981, pp. 245-256.

WENDELER, C; MCARDELL, B.; RICKENMANN, D.; VOLKWEIN, A; ROTH, A.; DENK, M. (2006) Field Testing and Numerical Modeling of Flexible Debris Flow Barriers. Debris-Flow Hazards Mitig. Mech. Predict. Assess. Millpress, Rotterdam. Pp. 681-687.

WENDELER, C.; VOLKWEIN, A.; DENK, M.; ROTH, A.; WARTMANN, S. (2007) Field measurements used for numerical modelling of flexible debris flow barriers. In: Chen C, Major J (eds) Debris-flow hazards mitigation mechanics, prediction and assessment, Millpress, Rotterdam. 12 p.

WENDELER, C. (2008) Murgangsruckhalt in wildbachen. grundlage zur planung und berechnung von flexiblen barrieren. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich.

YU, F.C. (1992) A study on the impact force of debris-flow. Proceedings of the national science council. Part A: Physical Science and Engineering. Taipei. Taiwan. Vol. 16/1992. No. 1: pp. 32-39. 32.

YAMAGUCHI, I. (1985) Erosion Control Engineering, ISBN: 4-8049-5064-8.

ZHANG, S. (1993) A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in china. Nat Hazards 7:1–23.

ZHANG, S.; CHEN, J.; YE, M. (1990) Measurement and research of physical parameters of debris flow in Jiangjia Ravine, in J. Wu et al. (eds.), Debris Flow Observation and Research in Jiangjia Ravine, Yunnan, Science Press, Beijing, pp. 141-164, 213-217 (in Chinese).

ZANUTTIGH, B.; LAMBERTI, A. (2006) "Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows ", Journal of Hydraulic Research, Vol. 44, No. 4, pp. 522-534.

APENDICE I

ANÁLISES DE MODELOS HIDROSTÁTICOS E HIDRODINÂMICOS

Córrego D'Antas – Zona 1

GRUPO 1

DADOS	MODELOS HIDROSTÁTICOS (GRUPO 1) - CÓRREGO D'ANTAS ZONA 1				
$P_{\max} = k \rho g h$	Lichtenhahn		Scotton and Deganutti		Armanini & Scotton
k	2,8	4,4	2,5	7,5	4,5
p (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000
g (m/s ²)	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Pmax (kPa) em 100 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 300 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 400 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 425 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 450 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 475 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 500 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 525 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 550 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 575 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 600 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 625 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
Pmax (kPa) em 650 m	43,9	69,1	39,2	117,7	5,8
Pmax (kPa) em 675 m	41,2	64,7	36,8	110,4	5,1
Pmax (kPa) em 700 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
Pmax (kPa) em 725 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
Pmax (kPa) em 750 m	33,0	51,8	29,4	88,3	3,2

GRUPO 2

DADOS	MODELOS HIDRODINÁMICOS (GRUPO 2) - Córrego D'Antas Zona 1																
$P_{\max} = \alpha \rho v^2$	Watanabe and Ikeya		Zhang		Wendeler		Bugnion		Du	Mizuyama		Hungr	Ishikawa		Canelli		Vandine
α	2	4	3	5	0,7	2	0,4	2	3	1	2	1,5	1	1,8	1,5	5	1
ρ (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Pmax (kPa) em 100 m	441,0	882,0	661,5	1102,5	154,4	441,0	88,2	441,0	661,5	220,5	441,0	330,8	220,5	396,9	330,8	1102,5	220,5
Pmax (kPa) em 300 m	121,0	242,0	181,5	302,5	42,4	121,0	24,2	121,0	181,5	60,5	121,0	90,8	60,5	108,9	90,8	302,5	60,5
Pmax (kPa) em 400 m	74,0	147,9	110,9	184,9	25,9	74,0	14,8	74,0	110,9	37,0	74,0	55,5	37,0	66,6	55,5	184,9	37,0
Pmax (kPa) em 425 m	74,0	147,9	110,9	184,9	25,9	74,0	14,8	74,0	110,9	37,0	74,0	55,5	37,0	66,6	55,5	184,9	37,0
Pmax (kPa) em 450 m	74,0	147,9	110,9	184,9	25,9	74,0	14,8	74,0	110,9	37,0	74,0	55,5	37,0	66,6	55,5	184,9	37,0
Pmax (kPa) em 475 m	77,4	154,9	116,2	193,6	27,1	77,4	15,5	77,4	116,2	38,7	77,4	58,1	38,7	69,7	58,1	193,6	38,7
Pmax (kPa) em 500 m	81,0	162,0	121,5	202,5	28,4	81,0	16,2	81,0	121,5	40,5	81,0	60,8	40,5	72,9	60,8	202,5	40,5
Pmax (kPa) em 525 m	84,6	169,3	127,0	211,6	29,6	84,6	16,9	84,6	127,0	42,3	84,6	63,5	42,3	76,2	63,5	211,6	42,3
Pmax (kPa) em 550 m	70,6	141,1	105,8	176,4	24,7	70,6	14,1	70,6	105,8	35,3	70,6	52,9	35,3	63,5	52,9	176,4	35,3
Pmax (kPa) em 575 m	49,0	98,0	73,5	122,5	17,2	49,0	9,8	49,0	73,5	24,5	49,0	36,8	24,5	44,1	36,8	122,5	24,5
Pmax (kPa) em 600 m	25,0	50,0	37,5	62,5	8,8	25,0	5,0	25,0	37,5	12,5	25,0	18,8	12,5	22,5	18,8	62,5	12,5
Pmax (kPa) em 625 m	27,0	54,1	40,6	67,6	9,5	27,0	5,4	27,0	40,6	13,5	27,0	20,3	13,5	24,3	20,3	67,6	13,5
Pmax (kPa) em 650 m	29,2	58,3	43,7	72,9	10,2	29,2	5,8	29,2	43,7	14,6	29,2	21,9	14,6	26,2	21,9	72,9	14,6
Pmax (kPa) em 675 m	29,2	58,3	43,7	72,9	10,2	29,2	5,8	29,2	43,7	14,6	29,2	21,9	14,6	26,2	21,9	72,9	14,6
Pmax (kPa) em 700 m	27,0	54,1	40,6	67,6	9,5	27,0	5,4	27,0	40,6	13,5	27,0	20,3	13,5	24,3	20,3	67,6	13,5
Pmax (kPa) em 725 m	27,0	54,1	40,6	67,6	9,5	27,0	5,4	27,0	40,6	13,5	27,0	20,3	13,5	24,3	20,3	67,6	13,5
Pmax (kPa) em 750 m	16,0	32,0	24,0	40,0	5,6	16,0	3,2	16,0	24,0	8,0	16,0	12,0	8,0	14,4	12,0	40,0	8,0
Pmax (kPa) em 775 m	6,8	13,5	10,1	16,9	2,4	6,8	1,4	6,8	10,1	3,4	6,8	5,1	3,4	6,1	5,1	16,9	3,4
Pmax (kPa) em 800 m	2,6	5,1	3,8	6,4	0,9	2,6	0,5	2,6	3,8	1,3	2,6	1,9	1,3	2,3	1,9	6,4	1,3

GRUPO 3

DADOS	MODELOS HIDRODINÂMICOS (GRUPO 3) - CÓRREGO D'ANTAS ZONA 1			
$P_{\max} = 5 \rho v^{0,8} (g h)^{0,6}$ $P_{\max} = a Fr^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$ $P_{\max} = 5,3 Fr^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	Hubl & Holzinger	Cui	Hubl	
Pmax (kPa) em 100 m	149,0	95,8	123,6	72,0
Pmax (kPa) em 300 m	88,8	69,3	78,6	57,7
Pmax (kPa) em 400 m	72,9	61,3	66,2	53,1
Pmax (kPa) em 425 m	72,9	61,3	66,2	53,1
Pmax (kPa) em 450 m	72,9	61,3	66,2	53,1
Pmax (kPa) em 475 m	74,3	62,0	67,2	53,5
Pmax (kPa) em 500 m	75,6	62,7	68,3	53,9
Pmax (kPa) em 525 m	77,0	63,4	69,4	54,3
Pmax (kPa) em 550 m	81,8	71,6	75,2	63,4
Pmax (kPa) em 575 m	70,7	65,4	66,2	59,6
Pmax (kPa) em 600 m	54,0	55,2	52,3	53,2
Pmax (kPa) em 625 m	68,2	72,5	66,9	71,2
Pmax (kPa) em 650 m	76,2	81,7	75,0	80,6
Pmax (kPa) em 675 m	73,3	77,8	71,9	76,4
Pmax (kPa) em 700 m	68,2	72,5	66,9	71,2
Pmax (kPa) em 725 m	68,2	72,5	66,9	71,2
Pmax (kPa) em 750 m	50,4	56,6	50,4	57,3

Córrego D'Antas – Zona 2

GRUPO 1

DADOS	MODELOS HIDROSTÁTICOS (GRUPO 1) - CÓRREGO D'ANTAS ZONA 2				
$P_{\max} = k \rho g h$	Lichtenhahn		Scotton and Deganutti		Armanini & Scotton
k	2,8	4,4	2,5	7,5	4,5
p (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000
g (m/s ²)	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Pmax (kPa) em 100 m	19,2	30,2	17,2	51,5	1,1
Pmax (kPa) em 300 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 400 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 425 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 450 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 475 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 500 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 525 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
Pmax (kPa) em 550 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 575 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 600 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 625 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 650 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 675 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 700 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 725 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
Pmax (kPa) em 750 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3

GRUPO 2

DADOS	MODELOS HIDRODINÂMICOS (GRUPO 2) - Córrego D'Antas Zona 2																
$P_{max} = a \rho v^2$	Watanabe and Ikeya		Zhang		Wendeler		Bugnion		Du	Mizuyama		Hungr	Ishikawa		Canelli		Vandine
α	2	4	3	5	0,7	2	0,4	2	3	1	2	1,5	1	1,8	1,5	5	1
ρ (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Pmax (kPa) em 100 m	432,6	865,3	649,0	1081,6	151,4	432,6	86,5	432,6	649,0	216,3	432,6	324,5	216,3	389,4	324,5	1081,6	216,3
Pmax (kPa) em 300 m	92,2	184,3	138,2	230,4	32,3	92,2	18,4	92,2	138,2	46,1	92,2	69,1	46,1	82,9	69,1	230,4	46,1
Pmax (kPa) em 400 m	148,8	297,7	223,3	372,1	52,1	148,8	29,8	148,8	223,3	74,4	148,8	111,6	74,4	134,0	111,6	372,1	74,4
Pmax (kPa) em 425 m	158,8	317,5	238,1	396,9	55,6	158,8	31,8	158,8	238,1	79,4	158,8	119,1	79,4	142,9	119,1	396,9	79,4
Pmax (kPa) em 450 m	134,6	269,1	201,8	336,4	47,1	134,6	26,9	134,6	201,8	67,3	134,6	100,9	67,3	121,1	100,9	336,4	67,3
Pmax (kPa) em 475 m	125,4	250,9	188,2	313,6	43,9	125,4	25,1	125,4	188,2	62,7	125,4	94,1	62,7	112,9	94,1	313,6	62,7
Pmax (kPa) em 500 m	130,0	259,9	194,9	324,9	45,5	130,0	26,0	130,0	194,9	65,0	130,0	97,5	65,0	117,0	97,5	324,9	65,0
Pmax (kPa) em 525 m	92,2	184,3	138,2	230,4	32,3	92,2	18,4	92,2	138,2	46,1	92,2	69,1	46,1	82,9	69,1	230,4	46,1
Pmax (kPa) em 550 m	57,8	115,5	86,6	144,4	20,2	57,8	11,6	57,8	86,6	28,9	57,8	43,3	28,9	52,0	43,3	144,4	28,9
Pmax (kPa) em 575 m	46,2	92,5	69,4	115,6	16,2	46,2	9,2	46,2	69,4	23,1	46,2	34,7	23,1	41,6	34,7	115,6	23,1
Pmax (kPa) em 600 m	46,2	92,5	69,4	115,6	16,2	46,2	9,2	46,2	69,4	23,1	46,2	34,7	23,1	41,6	34,7	115,6	23,1
Pmax (kPa) em 625 m	21,2	42,3	31,7	52,9	7,4	21,2	4,2	21,2	31,7	10,6	21,2	15,9	10,6	19,0	15,9	52,9	10,6
Pmax (kPa) em 650 m	13,0	25,9	19,4	32,4	4,5	13,0	2,6	13,0	19,4	6,5	13,0	9,7	6,5	11,7	9,7	32,4	6,5
Pmax (kPa) em 675 m	14,4	28,9	21,7	36,1	5,1	14,4	2,9	14,4	21,7	7,2	14,4	10,8	7,2	13,0	10,8	36,1	7,2
Pmax (kPa) em 700 m	9,0	18,0	13,5	22,5	3,2	9,0	1,8	9,0	13,5	4,5	9,0	6,8	4,5	8,1	6,8	22,5	4,5
Pmax (kPa) em 725 m	3,2	6,5	4,9	8,1	1,1	3,2	0,6	3,2	4,9	1,6	3,2	2,4	1,6	2,9	2,4	8,1	1,6
Pmax (kPa) em 750 m	1,4	2,9	2,2	3,6	0,5	1,4	0,3	1,4	2,2	0,7	1,4	1,1	0,7	1,3	1,1	3,6	0,7

GRUPO 3

DADOS	MODELOS HIDRODINÂMICOS (GRUPO 3) - CÓRREGO D'ANTAS ZONA 2			
$P_{\max} = 5 \rho v^{0,8} (g h)^{0,6}$ $P_{\max} = a Fr^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$ $P_{\max} = 5,3 Fr^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	Hubl & Holzinger	Cui	Hubl	
Pmax (kPa) em 100 m	136,5	86,2	112,6	64,2
Pmax (kPa) em 300 m	79,7	64,7	71,5	55,1
Pmax (kPa) em 400 m	96,5	73,0	84,5	59,8
Pmax (kPa) em 425 m	99,0	74,2	86,4	60,5
Pmax (kPa) em 450 m	92,7	71,2	81,6	58,8
Pmax (kPa) em 475 m	90,1	69,9	79,6	58,1
Pmax (kPa) em 500 m	91,4	70,6	80,6	58,5
Pmax (kPa) em 525 m	79,7	64,7	71,5	55,1
Pmax (kPa) em 550 m	75,5	68,1	70,1	61,3
Pmax (kPa) em 575 m	69,1	64,4	64,9	59,0
Pmax (kPa) em 600 m	69,1	64,4	64,9	59,0
Pmax (kPa) em 625 m	50,6	53,0	49,4	51,7
Pmax (kPa) em 650 m	41,6	46,9	41,6	47,5
Pmax (kPa) em 675 m	43,4	48,2	43,2	48,4
Pmax (kPa) em 700 m	35,9	42,8	36,6	44,7
Pmax (kPa) em 725 m	23,9	33,1	25,6	37,6
Pmax (kPa) em 750 m	17,3	27,1	19,3	32,7

HOSPITAL SÃO LUCAS

GRUPO 1

DADOS	MODELOS HIDROSTÁTICOS (GRUPO 1) - HOSPITAL SÃO LUCAS				
$P_{\max} = k \rho g h$	Lichtenhahn		Scotton and Deganutti		Armanini & Scotton
k	2,8	4,4	2,5	7,5	4,5
p (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000
g (m/s ²)	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
P _{max} (kPa) em 100 m	19,2	30,2	17,2	51,5	1,1
P _{max} (kPa) em 300 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
P _{max} (kPa) em 400 m	22,0	34,5	19,6	58,9	1,4
P _{max} (kPa) em 425 m	27,5	43,2	24,5	73,6	2,3
P _{max} (kPa) em 450 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
P _{max} (kPa) em 475 m	43,9	69,1	39,2	117,7	5,8
P _{max} (kPa) em 500 m	54,9	86,3	49,1	147,2	9,0
P _{max} (kPa) em 525 m	54,9	86,3	49,1	147,2	9,0
P _{max} (kPa) em 550 m	49,4	77,7	44,1	132,4	7,3
P _{max} (kPa) em 575 m	49,4	77,7	44,1	132,4	7,3
P _{max} (kPa) em 600 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
P _{max} (kPa) em 625 m	38,5	60,4	34,3	103,0	4,4
P _{max} (kPa) em 650 m	54,9	86,3	49,1	147,2	9,0
P _{max} (kPa) em 675 m	54,9	86,3	49,1	147,2	9,0
P _{max} (kPa) em 700 m	54,9	86,3	49,1	147,2	9,0
P _{max} (kPa) em 725 m	65,9	103,6	58,9	176,6	13,0
P _{max} (kPa) em 750 m	82,4	129,5	73,6	220,7	20,3
P _{max} (kPa) em 775 m	94,5	148,5	84,4	253,1	26,6
P _{max} (kPa) em 800 m	109,9	172,7	98,1	294,3	36,0

GRUPO 2

DADOS	MODELOS HIDRODINÂMICOS (GRUPO 2) - Hospital São Lucas																
$P_{max} = a \rho v^2$	Watanabe and Ikeya		Zhang		Wendeler		Bugnion		Du	Mizuyama		Hungr	Ishikawa		Canelli		Vandine
α	2	4	3	5	0,7	2	0,4	2	3	1	2	1,5	1	1,8	1,5	5	1
ρ (kg/m ³)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Pmax (kPa) em 100 m	361,0	722,0	541,5	902,5	126,4	361,0	72,2	361,0	541,5	180,5	361,0	270,8	180,5	324,9	270,8	902,5	180,5
Pmax (kPa) em 300 m	213,2	426,3	319,7	532,9	74,6	213,2	42,6	213,2	319,7	106,6	213,2	159,9	106,6	191,8	159,9	532,9	106,6
Pmax (kPa) em 400 m	104,0	208,1	156,1	260,1	36,4	104,0	20,8	104,0	156,1	52,0	104,0	78,0	52,0	93,6	78,0	260,1	52,0
Pmax (kPa) em 425 m	92,2	184,3	138,2	230,4	32,3	92,2	18,4	92,2	138,2	46,1	92,2	69,1	46,1	82,9	69,1	230,4	46,1
Pmax (kPa) em 450 m	92,2	184,3	138,2	230,4	32,3	92,2	18,4	92,2	138,2	46,1	92,2	69,1	46,1	82,9	69,1	230,4	46,1
Pmax (kPa) em 475 m	70,6	141,1	105,8	176,4	24,7	70,6	14,1	70,6	105,8	35,3	70,6	52,9	35,3	63,5	52,9	176,4	35,3
Pmax (kPa) em 500 m	54,8	109,5	82,1	136,9	19,2	54,8	11,0	54,8	82,1	27,4	54,8	41,1	27,4	49,3	41,1	136,9	27,4
Pmax (kPa) em 525 m	60,8	121,7	91,3	152,1	21,3	60,8	12,2	60,8	91,3	30,4	60,8	45,6	30,4	54,8	45,6	152,1	30,4
Pmax (kPa) em 550 m	64,0	128,0	96,0	160,0	22,4	64,0	12,8	64,0	96,0	32,0	64,0	48,0	32,0	57,6	48,0	160,0	32,0
Pmax (kPa) em 575 m	49,0	98,0	73,5	122,5	17,2	49,0	9,8	49,0	73,5	24,5	49,0	36,8	24,5	44,1	36,8	122,5	24,5
Pmax (kPa) em 600 m	57,8	115,5	86,6	144,4	20,2	57,8	11,6	57,8	86,6	28,9	57,8	43,3	28,9	52,0	43,3	144,4	28,9
Pmax (kPa) em 625 m	70,6	141,1	105,8	176,4	24,7	70,6	14,1	70,6	105,8	35,3	70,6	52,9	35,3	63,5	52,9	176,4	35,3
Pmax (kPa) em 650 m	100,0	200,0	150,0	250,0	35,0	100,0	20,0	100,0	150,0	50,0	100,0	75,0	50,0	90,0	75,0	250,0	50,0
Pmax (kPa) em 675 m	112,4	224,7	168,5	280,9	39,3	112,4	22,5	112,4	168,5	56,2	112,4	84,3	56,2	101,1	84,3	280,9	56,2
Pmax (kPa) em 700 m	112,4	224,7	168,5	280,9	39,3	112,4	22,5	112,4	168,5	56,2	112,4	84,3	56,2	101,1	84,3	280,9	56,2
Pmax (kPa) em 725 m	77,4	154,9	116,2	193,6	27,1	77,4	15,5	77,4	116,2	38,7	77,4	58,1	38,7	69,7	58,1	193,6	38,7
Pmax (kPa) em 750 m	49,0	98,0	73,5	122,5	17,2	49,0	9,8	49,0	73,5	24,5	49,0	36,8	24,5	44,1	36,8	122,5	24,5
Pmax (kPa) em 775 m	43,56	87,12	65,34	108,9	15,246	43,56	8,712	43,56	65,34	21,78	43,56	32,67	21,78	39,204	32,67	108,9	21,78
Pmax (kPa) em 800 m	33,64	67,28	50,46	84,1	11,774	33,64	6,728	33,64	50,46	16,82	33,64	25,23	16,82	30,276	25,23	84,1	16,82

GRUPO 3

DADOS	MODELOS HIDRODINÂMICOS (GRUPO 3) - HOSPITAL SÃO LUCAS			
$P_{\max} = 5 \rho v^{0,8} (g h)^{0,6}$ $P_{\max} = a Fr^b \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$ $P_{\max} = 5,3 Fr^{-1,5} \cdot \rho_{Mu} \cdot v^2$	Hubl & Holzinger	Cui	Hubl	
Pmax (kPa) em 100 m	126,9	82,4	105,6	62,2
Pmax (kPa) em 300 m	111,4	79,8	95,8	63,6
Pmax (kPa) em 400 m	83,6	66,7	74,6	56,3
Pmax (kPa) em 425 m	91,1	76,5	82,6	66,4
Pmax (kPa) em 450 m	111,4	98,5	102,8	87,7
Pmax (kPa) em 475 m	108,5	101,9	102,1	93,7
Pmax (kPa) em 500 m	112,1	113,0	108,0	108,0
Pmax (kPa) em 525 m	116,9	116,0	112,1	109,9
Pmax (kPa) em 550 m	112,0	108,6	106,5	101,6
Pmax (kPa) em 575 m	100,6	101,6	97,0	97,1
Pmax (kPa) em 600 m	92,4	87,7	87,3	81,0
Pmax (kPa) em 625 m	100,2	92,2	93,6	83,8
Pmax (kPa) em 650 m	142,6	131,4	133,4	119,6
Pmax (kPa) em 675 m	149,4	135,3	138,9	122,0
Pmax (kPa) em 700 m	149,4	135,3	138,9	122,0
Pmax (kPa) em 725 m	143,6	141,3	137,3	133,2
Pmax (kPa) em 750 m	136,7	149,0	135,2	148,3
Pmax (kPa) em 775 m	141,6	160,3	141,9	162,9
Pmax (kPa) em 800 m	139,8	168,3	142,9	176,7